

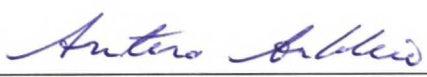
TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Juha-Pekka Kivioja

NOPEUSSÄÄDETTYJEN TAHTIMOOTTOREIDEN
MITOITUSOHJELMAN KEHITTÄMINEN

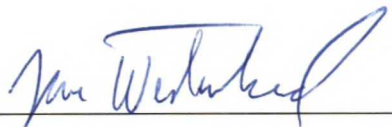
Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Työn valvoja



Professori Antero Arkkio

Työn ohjaaja



DI Jan Westerlund, ABB Oy / Sähkökoneet

Tiivistelmä

TEKNILLINEN KORKEAKOULU		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä:	Juha-Pekka Kivioja		
Työn nimi:	NOPEUSSÄÄDETTYJEN TAHTIMOOTTOREIDEN MITOITUSOHJELMAN KEHITTÄMINEN		
Päivä:	30. kesäkuuta 2003	Sivumäärä: 80	
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto		
Professori:	S-17 Sähkömekaniikka		
Työn valvoja:	Professori Antero Arkkio		
Työn ohjaaja:	DI Jan Westerlund, ABB Oy / Sähkökoneet		
<p>Tässä diplomityössä kehitetään nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoittamista tarjouslaskentaohjelma Nestorissa. Työssä tutkitaan millainen on hyvä sekä myyjien että suunnittelijoiden tarpeet täyttävä tarjoustyökalun käyttöliittymä ja mitoituslogiikka nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden tarjouslaskentaa varten.</p> <p>Työn lähtökohtana on kaksi olemassa olevaa nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden tarjouslaskentaohjelmaa.</p> <ol style="list-style-type: none">1. Nestori on Borland Delphi –sovelluskehitystyökalulla ohjelmoitu Windows –sovellus. Nestori mitoittaa automaattisesti tahtigeneraattoreita, suoraan verkkoon käynnistettäviä ja metalliteollisuuden nopeussäädettyjä tahtimoottoreita asiakkaan antamien lähtötietojen perusteella.2. Bemari tarjouslaskentaohjelma on puolestaan Microsoft Excel –sovellus. Bemarin laskentatarkkuus on riittävä alustavien tarjouksien tekoon. Sillä voi mitoittaa laivojen Azipod –ruoripotkurimoottoreita, tavallisia potkurimoottoreita sekä tahtigeneraattoreita. <p>Työssä suunnitellaan ja toteutetaan eri sovellusten nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden automaattinen mitoittaminen Nestori –tarjouslaskentaohjelmassa. Ohjelma palvelee sekä kehittyneitä käyttäjiä (sähkösuunnittelijat) että peruskäyttäjiä (myyjät). Erityisesti laivakäyttöjen mitoituksessa on ylläpidetty Bemarin tasoinen käyttäjäystävällisyys ja helppous potkurimoottori- sekä Azipod –sovelluksille.</p> <p>Metalliteollisuuden sovellusten mitoituksen kehitys keskittyy lähinnä jännitevälipiirillisellä taajuusmuuttajalla (ACS 6000SD) ohjattujen moottoreiden raja-arvojen laskentaan. Työn tuloksena on olemassa vain yksi yhtenäinen tarjouslaskentaohjelma. Tämä yksinkertaistaa ja yhtenäistää nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoituksen ja tarjouksen tekoa.</p> <p>Työn alussa tutustutaan tahtikoneiden sovelluksiin ja eri taajuusmuuttajaratkaisuihin. Perehdytään myös käytännönläheisesti nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoitukseen. Myös ACS 6000SD -taajuusmuuttajan aiheuttamia lisähäviöitä tutkitaan numeeristen simulointien avulla. Lopussa esitellään toteutettu nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoittaminen tarjousta varten.</p>			
Avainsanat:	Avonapainen, nopeussäädetty, tahtimoottori, Delphi		

Abstract

HELSINKI UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

ABSTRACT OF THE
MASTER’S THESIS

Author:	Juha-Pekka Kivioja		
Name of the Thesis:	DEVELOPMENT OF VARIABLE SPEED DRIVE SYNCHRONOUS MOTOR DIMENSIONING PROGRAM		
Date:	30. June 2003	Number of pages:	80
Department:	Department of Electrical and Communications Engineering		
Professorship:	S-17 Electrical Engineering (Electromechanics)		
Supervisor:	Professor Antero Arkkio, Dr.Sc.(Tech.)		
Instructor:	Jan Westerlund, M.Sc.(Tech.), ABB Oy / Machines		
<p>In this master's thesis variable speed drive synchronous motor dimensioning is to be developed in the Nestori offer calculation tool. It is to be researched what kind of calculation logic and graphical user interface full fills the needs of both designers and sellers.</p> <p>To begin, there are two different offer calculation programs for variable speed synchronous motors.</p> <ol style="list-style-type: none">1. Nestori, which is a Windows-based application, programmed by software development tool Borland Delphi, calculates automatically synchronous generators, and direct on line (DOL) connected and variable speed drive (VSD) motors from customer requirements.2. Bemari, which is a Microsoft Excel application, dimensions regular and Azipod propulsion motors, as well as synchronous generators. <p>Automatic dimensioning of variable speed drive synchronous motor for different kind of applications is to be designed and implemented in the Nestori. Program is a useful tool for both advanced users (electrical designers) and basic users (sellers). Especially the user interface and marine motors dimensioning is to be maintained as user friendly as in Bemari.</p> <p>Dimensioning development for metal industry applications focuses mainly on limit calculation for motors fed by voltage source inverter (ACS 6000SD). The result of this development is that currently only one offer calculation program exists, which helps to standardize and simplify the offer calculation process of variable speed drive synchronous motors.</p> <p>The first part of the work concentrates on applications and different frequency converters used with synchronous motors. This part is to be followed by a study of the dimensioning theory of variable speed drive synchronous motors. Numerical simulations are used to research additional losses caused by the ACS 6000SD frequency converter. The last part of the work describes dimensioning of variable speed drive synchronous motors for offer calculation implementation.</p>			
Keywords:	Salient-pole, variable speed drive, synchronous motor, Delphi		

Alkulause

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy Sähkökoneiden Tahtikoneet –tulosityksikössä tuotekehitysosaston Tuotetieto –tiimissä. Työ aloitettiin lokakuussa 2002, jolloin alkoi työn esiselvitysten teko osapäivätyöskentelynä. Esiselvitystyön aikana perehdyttiin olemassa oleviin ohjelmiin ja tehtiin ensimmäisiä testiversioita ohjelmasta. Täysipäiväinen työskentely alkoi tammikuussa 2003 ja työ saatiin päätökseen heinäkuussa 2003.

Työn valvojana toimi pääaineeni professori Antero Arkkio. Häntä tahdon kiittää neuvoista ja kommentteista sekä kuluneiden vuosien asiantuntevasta opetuksesta sähkömekaniikan pääaineopinnoissa.

Työn aihe oli tarjouslaskentaohjelma Nestorin ensimmäisen version suunnittelijan, tuotekehityspäällikkö Jouni Jaakkolan idea. Tahdon kiittää häntä diplomityöni mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta. Suuret kiitokset myös työn ohjaajalle Jan Westerlundille, joka jaksoi vastailla kysymyksiini. Nopean tiedonvaihdon mahdollisti avokonttoriympäristö, missä istuimme vastakkain.

Suunnittelu ja toteutusvaiheessa työ toteutettiin tiimityönä, jossa kukin tähän projektiin osallistunut antoi oman näkemyksensä ja osaamisensa työlle. Projektissa oli niin sanottu ydinryhmä, jossa oli mukana tuotekehityksen asiantuntijoita sekä asiakastiimien suunnittelijoita ja myyjiä. Tahdon osoittaa suurta kiitollisuutta Teille ja muille, jotka ovat edesauttaneet tämän työn valmistumista.

Viimeisenä, mutta ei vähäisimpänä tahdon kiittää kihlattuani Marjaanaa, joka oli yksi tämän projektin onnistuneen lopputuloksen avainhenkilöistä.

Helsingissä 30.6.2003



Juha-Pekka Kivioja

Sisällysluettelo

Tiivistelmä2

Abstract.....3

Alkulause4

Sisällysluettelo5

Symbolit ja lyhenteet7

1 Johdanto9

1.1 Työn tausta.....9

1.2 Työn tavoite10

1.3 Työn rakenne10

1.4 Työn toteutuksesta ja tuloksista lyhyesti11

2 Avonapainen nopeussäädetty tahtimoottori.....12

2.1 Yleistä12

2.2 Esimerkkejä nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden sovelluksista13

2.2.1 Potkurikäytöt.....13

2.2.2 Nostolaitekäytöt15

2.2.3 Valssaimet.....16

3 Suuritehoisten tahtimoottoreiden taajuusmuuttajat17

3.1 Syklokonvertteri.....18

3.1.1 ACS 6000 C19

3.2 Kuormakommutoiva suuntaaja (LCI)20

3.3 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja21

3.3.1 Suora vääntömomentin säätö (DTC)22

3.3.2 ACS 6000 SD.....23

4 Nopeussäädetyn tahtimoottorin mitoitus.....25

4.1 Yleistä25

4.2 Mitoituksen peruslähtökohdat.....26

4.2.1 Perusyhtälöt.....26

4.2.2 Lämpenemä.....28

4.2.3 Vääntömomentti ja teho30

4.2.4 Vastamomentti31

4.2.5 Ylikuormat32

4.3 Häviöt ja jäähdytys34

4.3.1 Rautahäviöt34

4.3.2 Kuparihäviöt35

4.3.3 Jäähdytys.....35

4.3.4 Taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt.....36

4.4 Mitoitusprosessi / mitoituksen kulku37

4.4.1 Eri sovellusten mitoituksesta39

5 Sähkösuunnitteluohjelmat41

5.1 Yleistä41

5.2 Analyytinen mitoitusohjelma - THW42

5.3 Numeeriset laskentaohjelmat43

6 Tarjouslaskentaohjelmat.....44

6.1 Tarjouslaskentaohjelma - Nestori44

6.1.1 Sovelluksen kehitysympäristö – Delphi 5.....45

6.1.2 Nestorin käyttöliittymä45

6.1.3 Nestorin tietokantarakenne45

6.1.4	Nestorin tulosteet	46
6.2	Tarjouslaskentaohjelma - Bemari	46
6.2.1	Bemarin käyttöliittymä	46
6.2.2	Bemarin tulosteet ja liitännät	47
7	Nopeussäädettyjen moottoreiden tarjouslaskennan kehityssuunnitelma	48
7.1	Yleistä	48
7.2	Käyttäjien asettamat tarpeet	48
7.2.1	Myynnin tarpeet	49
7.2.2	Suunnittelun tarpeet	49
7.3	Bemarin toimintojen integrointi Nestoriin	50
7.3.1	Mitoitusparametrit	50
7.3.2	Uudet peruskoneet	50
7.4	Mitoitustietämyksen kerääminen	50
8	Toteutettu nopeussäädettyjen moottoreiden tarjouslaskenta.....	51
8.1	Yleistä	51
8.2	Mitoituksen lähtötiedot	52
8.2.1	Metalliteollisuusmoottoreiden mitoitusparametrit	52
8.2.2	Azipod –ruoripotkurimoottoreiden mitoitusparametrit	52
8.2.3	Tavallisten potkurimoottoreiden mitoitusparametrit	52
8.3	Peruskoneen haku	53
8.3.1	Kaksistaattorijärjestelmän vaikutus peruskoneen hakuun	53
8.4	Yhteiset mitoitusproseduurit	54
8.4.1	Pituuden muutos	54
8.4.2	Käämityksen muutos	55
8.5	Metalliteollisuusmoottoreiden laskenta	56
8.5.1	Virrantiheysrajat	57
8.5.2	Laskentapistet ja tarkistukset	64
8.5.3	Koneen valintakriteerit	64
8.6	Azipod- ja potkurimoottoreiden laskenta	65
8.7	Tekninen spesifikaatio	66
9	Johtopäätökset	67
9.1	Työn tuloksista	67
9.2	Jatkokehitys	68
10	Yhteenveto	69
Lähdeluettelo	70	
LIITE 1:	Jaksollinen ylikuorma	72
LIITE 2:	ACS 6000SD:n jännite ja virta	73
LIITE 3:	Nestorin käyttöliittymä 1	74
LIITE 4:	Nestorin käyttöliittymä 2	75
LIITE 5:	Bemarin käyttöliittymä	76
LIITE 6:	Nestorin uudet mitoitusparametrit (Metals)	77
LIITE 7:	Nestorin uudet mitoitusparametrit (Azipod)	78
LIITE 8:	Nestorin uudet mitoitusparametrit (Propulsion)	79
LIITE 9:	Taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt	80

Symbolit ja lyhenteet

Käytetyt symbolit

ω	kulmataajuus
δ	napakulma
ϕ	vuo
$\hat{\phi}$	vuon huippuarvo
φ	tehokulma
ρ_{Cu}	kuparin ominaisresistanssi
τ	aikavakio
ψ	käämivuo
Ω_{m}	mekaaninen kulmataajuus
a	rinnakkaisten haarojen lukumäärä
A	virtakate
A_{ϕ}	vuotien pinta-ala
A_1	johtimen pinta-ala
\hat{b}	vuontiheyden huippuarvo
B	vuontiheys
BI	vuontiheys ilmapälissä
$BZ11$	vuontiheys staattorin selässä
BIA	vuontiheys hampaassa
BM	vuontiheys napavarressa
dT	lämpenemä
D	ilmaväliahkaisija
e	indusoitunut jännite
f	taajuus
i_{S}	staattorivirta
i_{R}	roottorivirta
I_{n}	nimellisvirta
j	tehoisten johtimien lukumäärä
J	hitausmomentti
l	staattorin levysydämen pituus
L''	alkutilan induktanssi
n	pyörimisnopeus
N	käämin kierrosten lukumäärä
p	napaluku
P	teho
q	vakoluku
Q	uraluku
R	resistanssi
S	näennäisteho
$S1$	staattorin virrantiheys
$S2$	roottorin virrantiheys
t	aika
T	lämpötila
T_{e}	moottorin momentti
T_{L}	kuormamomentti

u_a, u_b, u_c	kolmivaihejärjestelmän vaihejännitteet
\hat{u}	jännitteen huippuarvo
U_n	nimellisjännite
V_ϕ	vuotien tilavuus
W	vyyhdenleveys

Käytetyt lyhenteet

ARU	ohjattava tasasuuntausyksikkö - active rectifier unit
DOL	suoraan verkkoon kytketty - direct on line
DLL	dynamic link library
DTC	suora vääntömomentin säätö - direct torque control
FEM	elementtimenetelmä – Finite Element Method
GTO	hilalta sammutettava tyristori - gate turn-off thyristor
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	insulated gate bipolar transistor
IGCT	insulated gate commutated thyristor
INU	vaihtosuuntausyksikkö - inverter unit
LCI	kuormakommutoituva taajuusmuuttaja - load commutated inverter
LSU	line supply unit
NPC	neutral point clamped
P0T0	vakioteho – vakiomomentti käyttö
PWM	pulssin leveys modulointi - pulse width modulation
SQL	structured query language
VSD	nopeussäädetty käyttö - variable speed drive

1 Johdanto

Sähkökoneen mitoittaminen asiakkaan vaatimusten mukaiseksi on erittäin haastava ja paljon laskentaa vaativa tehtävä. Nykyään laskentarutiinien suorittaminen ei ole ongelma, sillä tietokoneet pystyvät suorittamaan hyvinkin suuria laskutoimituksia sekunnin murto-osissa. Lisäksi tietokoneet ovat mahdollistaneet tietämyksen tallentamisen tietokantoihin. Näin aiempi tietämys on helposti hyödynnettävissä. Sähkökoneita on tehty jo yli 100 vuoden ajan, joten maailmalla pyörii tänä päivänä suhteellisen monta sähkökonetta. Tätä aiempaa tietämystä käytetään hyväksi myös tahtikoneiden mitoituksessa. Näin pystytään valmistamaan entistä paremmin asiakkaan vaatimukset täyttäviä tahtikoneita.

Tahtikoneita käytetään enemmän generaattoreina kuin moottoreina. Suurta tehoa vaativissa sähkökäyttöissä käytetään kuitenkin usein tahtimoottoreita. Etuna on muun muassa tahtimoottoreiden parempi hyötysuhde. Haittana on puolestaan kalliimpi hinta sekä monimutkaisempi rakenne. Tehoelektroniikkalaitteiden huima kehitys on mahdollistanut tahtimoottoreiden käytön yhä vaativimmissa prosesseissa. Nykyään pystytään säätämään myös suuritehoisten tahtimoottoreiden pyörimisnopeutta aina kymmenien megawattien tehoalueelle. Nopeussäädetyt tahtimoottorin mitoituksessa on myös otettava tarkoin huomioon kyseisen moottorin sovelluskohde, sillä moottori mitoitetaan sovelluksen aiheuttaman vastamomentin eli kuormitusmomentin mukaan. Moottoria ohjaava koneisto tuo puolestaan omat rajoituksensa mitoitukselle.

Tahtikoneen mitoitus alkaa, kun asiakas tekee kyselyn haluamastaan koneesta. Kyselyt ovat usein hintatiedusteluja, joista vain pieni osa johtaa tilaukseen. Tästä johtuen tarjous pitäisi olla nopeasti laskettuna ja tietysti mahdollisimman tarkka. Joissakin tapauksissa asiakkaan vaatimukset pystytään täyttämään jo aiemmin valmistetulla koneella, jolloin kone on mitoitettu jo valmiiksi. Usein näin ei kuitenkaan ole vaan koneen mitoitus on tehtävä uudestaan. Koneen mitoitus tarjouslaskentaohjelma Nestorissa perustuu niin sanottuihin peruskoneisiin. Peruskoneiksi on valittu koneita, jotka on todettu hyviksi niin teknisesti kuin taloudellisestikin. Peruskonetta muokkaamalla päästään haluttuun lopputulokseen. Näin mitoitus on tehtävissä nopeasti ja yleensä voidaan käyttää jo olemassa olevia työkaluja ja siten säästää myös valmistuskustannuksissa.

1.1 Työn tausta

ABB Oy Sähkökoneiden Tahtikoneet –yksikössä on kehitetty myyjien ja suunnittelijoiden tarpeisiin tarjouslaskentaohjelmia, joilla pystytään tekemään koneen alustava mitoitus mahdollisimman hyvin asiakkaan vaatimuksia vastaavaksi. Siten pystytään määrittelemään myös koneen alustava tekninen spesifikaatio ja hinta riittävän tarkasti tarjousta varten.

Tarjouslaskentaohjelma Nestori on ollut käytössä tahtigeneraattoreiden tarjouslaskennan osalta vuodesta 1998. Suoraan verkkoon käynnistettävien tahtimoottoreiden (DOL) sekä metalliteollisuuden nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden osalta tarjouslaskentaohjelma on otettu käyttöön vuonna 1999, jolloin John Shibutani teki diplomityönään Nestori –tarjouslaskentaohjelmaan tahtimoottoreiden mitoituksen

toteuttavan osion (Shibutani, 1998). Laivojen potkuri- sekä ruoripotkurimoottoreiden, Azipodien tarjouslaskenta toteutetaan toisella tarjouslaskentaohjelmalla, Bemarilla. Tämä ohjelma on ABB Oy Marinen myyntitoimistojen käytössä.

Bemarin toimintaperiaate on lähes sama kuin Nestorillakin, mutta on huomattavasti yksinkertaistetumpi. Nestorin periaatteena on, että se käyttää samoja menetelmiä ja laskentarutiineja, kuten sähkösuunnittelija mitoittaessaan konetta. Toisin sanoen sähkökoneen läpilaskentaan käytetään samoja mitoitusohjelmia, raja-arvoja sekä sääntöjä kuin varsinaisessa koneen mitoituksessa.

1.2 Työn tavoite

Työn tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa myynnin ja suunnittelun tarpeet täyttävä nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden automaattinen mitoitus tarjouslaskentaohjelma Nestorissa. Nestorilla tulee voida mitoittaa moottoreita erilaisiin sovelluksiin nopeasti ja luotettavasti. Tärkeimmät sovellusalueet ovat metalliteollisuus- sekä laivakäytöt.

Nestorin säätökäyttömoottoreiden mitoituksen käyttöliittymän tulee palvella kehittyneitä käyttäjiä (sähkösuunnittelijat) sekä peruskäyttäjiä (myyjät). Erityisesti laivakäyttöjen mitoituksessa on syytä ylläpitää Bemarin tasoinen käyttäjäystävällisyys ja helppous potkurimoottori- sekä Azipod –sovelluksille. Näin olisi olemassa vain yksi yhtenäinen tarjouslaskentaohjelma. Tämä yksinkertaistaa ja yhtenäistää koneen mitoituksen ja tarjouksen tekoa.

1.3 Työn rakenne

Työn alussa, luvussa kaksi perehdytään yleisellä tasolla avonapaiseen tahtimoottoriin erilaisissa nopeussäädetyissä sovelluksissa. Aluksi tutustutaan sähkömoottoreiden markkinatilanteeseen ja siihen, miten nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden myynti on kehittynyt 90 –luvulla. Käydään läpi, millaisissa sovelluksissa nopeussäädettyjä tahtimoottoreita yleensä käytetään. Luku antaa hyvän käsityksen siitä millaisia ominaisuuksia nopeussäädetyiltä tahtimoottoreilta vaaditaan erilaisissa sovelluksissa.

Luvussa kolme tutustutaan erilaisiin tahtimoottoreita ohjaaviin suuntaajaratkaisuihin. Selvitetään, miten erilaiset taajuusmuuttajat vaikuttavat tahtimoottorilta vaadittaviin ominaisuuksiin.

Neljännessä luvussa perehdytään ensin yleisesti tahtikoneen mitoituksen perusteisiin, jonka jälkeen keskitytään tarkemmin nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoitukseen. Luvussa käydään käytännönläheisesti läpi nopeussäädetyn tahtimoottorin mitoitus kokonaisuudessaan. Lisäksi perehdytään DTC –ohjatun jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan, ACS 6000SD aiheuttamien lisähäviöiden vaikutuksiin tahtimoottorin mitoituksessa. Luvun lopussa tarkastellaan vielä muutamaa oikeaa esimerkkisovellusta sekä niiden mitoittamisen lähtöarvoja ja erityisvaatimuksia.

Luvussa viisi ja kuusi esitellään ABB Oy Sähkökoneissa tällä hetkellä käytössä olevia laskentaohjelmia ja tutustutaan sähkölaskentatietojen kulkuun ja käsittelyyn kyseisissä

ohjelmissa. Tarkastellaan, kuinka tarjous- ja sähkölaskenta liittyvät ABB Oy Sähkökoneiden Tahtikoneet –yksikön tilaus-toimitusprosessiin.

Työn loppuosa, luvut seitsemän ja kahdeksan käsittelevät varsinaista kehitystyön kohteena olevaa tarjouslaskentaohjelmaa. Luvussa seitsemän esitellään tarjouslaskennan kehityssuunnitelma. Luvussa on perusteluita niille lisäyksille ja muutoksille, joita Nestoriin toteutettiin. Luku kahdeksan esittelee toteutetun nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden tarjouslaskennan. Luvussa on myös tuloksia simuloinneista, joissa määriteltiin ACS 6000SD –taajuusmuuttajan aiheuttamia lisähäviöitä.

Lopuksi analysoidaan työn tuloksia sekä annetaan lista ideoita Nestorin jatkokehitystä varten ja kootaan yhteenveto.

1.4 Työn toteutuksesta ja tuloksista lyhyesti

Diplomityössä keskitytään nopeussäädettyjen avonapaisten tahtimoottoreiden mitoittamiseen, joiden tehot ovat alueella 1 – 50 MW. Työssä selvitetään, millainen olisi hyvä, käyttäjien tarpeet täyttävä mitoitus- ja tarjouslaskentaohjelman käyttöliittymä ja erityisesti laskentalogiikka sen taustalla. Eri säätökäyttösovelluksien mitoitus ja graafinen käyttöliittymä toteutetaan Nestorissa. Myös laivakäyttöjen tahtimoottoreiden mitoitus ohjelmoidaan Nestoriin. Käyttöliittymän ja laskennan pohjana on Bemari – laskentaohjelma.

Samaan aikaan on kehitteillä Webbi-Nestori, joka on tarkoitus toteuttaa kaikille tahtikonetyypeille tämän työn jälkeen. Tämä otetaan myös huomioon ohjelmaa suunniteltaessa. Tavoitteena on, että Nestorin Internet:ssä toimiva versio käyttää samoja laskentarutiineja, kuin Nestorin Windows –sovellus. Webbi-Nestorin myötä tulevaisuudessa asiakas voi itse mitoittaa alustavan tarjouksen.

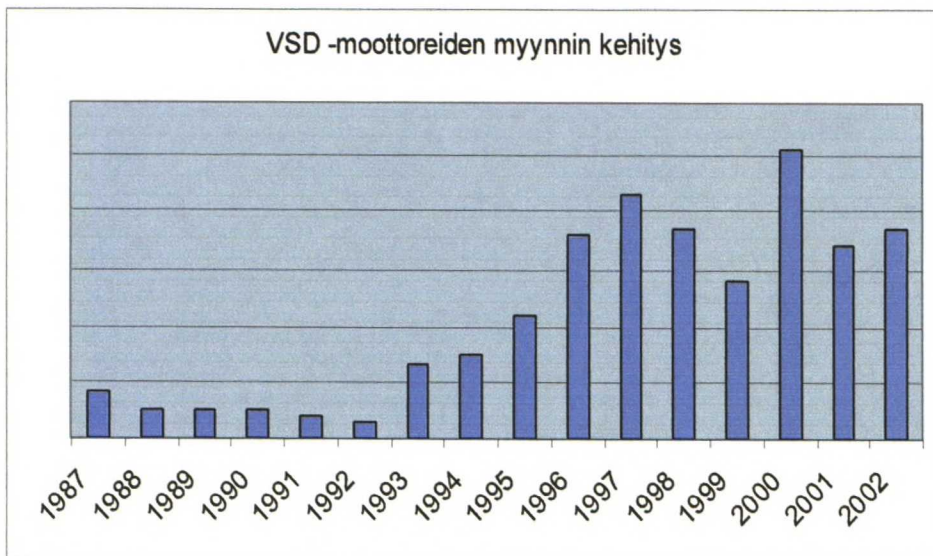
Virrantiheysperusteinen lämpenemälaskenta aiheuttaa omat haasteensa mitoittaessa suuren taajuuden (yli 40 Hz) ACS 6000SD:llä ohjattuja tahtimoottoreita, koska suurilla taajuuksilla rautahäviöiden kasvaessa häviöjakauma ei ole enää kuparihäviöpainotteinen. Suurilla taajuuksilla, myös ACS 6000SD –taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt kasvavat. Tätä ilmiötä tutkitaan numeerisen kenttälaskennan avulla ja tulosten perusteella parannetaan myös suuren taajuuden tahtimoottoreiden mitoitusta.

2 Avonapainen nopeussäädetty tahtimoottori

2.1 Yleistä

Vuonna 1999 moottorikäyttöjen maailmanmarkkinat olivat arvoltaan 5 miljardia dollaria. VTT Automaatioyksiköstä Risto Heinosen julkaiseman kirjan, Elektroniikka- ja sähköalan kehitysnäkymät 2000...2005 mukaan markkinoiden arvioidaan kaksinkertaistuvan seuraavien viiden vuoden aikana. ABB on tällä hetkellä alan suurin valmistaja noin 12 % markkinaosuudella. Vaihtovirtakäyttöjen (AC) osuus on noin 75 % ja tasavirtakäyttöjen (DC) osuus 25 %. Vaihtovirtakäyttöjen määrä tulee kasvamaan ja tasavirtakäyttöjen määrä tulee pysymään ennallaan tai laskemaan. Suomessa sähkömoottoreiden myynnistä noin puolet on oikosulkumoottoreita. Suomen sähköenergiasta sähkömoottorit kuluttavat noin 65 %. Näistä moottoreista suurin osa pyörii erilaisissa teollisuuden sovelluksissa.(Heinonen, 2000).

Oikosulkumoottori on yleisimmin käytetty moottorityyppi teollisuuskäytössä. Toinen merkittävä vaihtovirtakoneiden ryhmä on tahtikoneet. Tahtimoottoreita käytetään usein suurissa käytöissä, koska ne ovat usein taloudellisin ratkaisu. Nopeussäädettyjä tahtikoneita käytetään yhä enemmän erilaisissa sovelluskohteissa. Nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden myynti on kehittynyt voimakkaasti läpi 90 -luvun. Kuvassa 2.1 on esitetty nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden myynnin kehitys vuosien 1987 ja 2002 välisenä aikana ABB Oy Sähkökoneiden Tahtikoneet -tulosyksikössä.



KUVA 2.1 Nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden myynnin kehitys ABB Oy Sähkökoneissa vuosina 1987 – 2002. (Lähde: ABB Oy Sähkökoneet, referenssilistat).

2.2 Esimerkkejä nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden sovelluksista

Tyypillisesti nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden käyttökohteita ovat hitaasti pyörivät suuritehoiset käytöt. Tahtimoottoreita käytetään laivoissa, metalli-, kaivos- ja paperiteollisuudessa. Tahtimoottoreiden sovelluksia ovat muun muassa:

- potkurikäytöt, Azipod –ruoripotkurit, potkurimoottorit,
- kompressorit, mäntäkompressorit,
- valssaimet,
- kelaimet,
- nostolaitteet, kaivoshissit,
- malmi- ja sementtimyllyt,
- pumpput,
- puhaltimet,
- hiomot

Tahtimoottorin sovelluskohteet voidaan karkeasti jakaa kahteen eri sovellusryhmään: vakionopeussovellukset ja nopeussäädetyt sovellukset. Tehoelektroniikan halventuessa ja suuritehoisten tahtimoottoreiden nopeussäädön kehittyessä yhä useammassa sovelluskohteessa tullaan käyttämään nopeussäädettyjä tahtimoottoreita. Tässä kappaleessa tutustumme lähemmin yleisimpiin suuritehoisten tahtimoottoreiden nopeussäädettyihin sovelluksiin. Yleisimpiä tahtimoottoreiden nopeussäädettyjä sovelluksia ovat potkuri-, valssi- ja nostolaitteikäytöt.

2.2.1 Potkurikäytöt

Alunperin sähköiset potkurijärjestelmät kehitettiin jäänmurtajiin. Kyky tuottaa suuri momentti pienillä potkurin kierrosnopeuksilla oli pääsyy sähköisten potkurimoottoreiden käyttöön jäänmurtajissa. Suomalainen jäänmurtaja, Sisu, on ensimmäisiä jäänmurtajia maailmassa, jossa oli sähkömoottori potkurimoottorina. Käyttö oli Ward-Leonard (DC-DC) –tyyppinen, jossa dieseliin kytketty tasavirtageneraattori syöttää tasavirtapotkurimoottoria. Pyörimisnopeutta säädettiin generaattorin jännitettä säätämällä magnetointisäädöllä. (Segercrantz, 2000).

Tehopuolijohdeteknologian kehitys on mahdollistanut siirtymisen tasavirtakäytöistä vaihtovirtakäyttöihin. Aluksi käytettiin vain vaihtovirtageneraattoria, jonka virta tasasuunnattiin ja syötettiin tasavirtapotkurimoottorille. Nykyään lähes kaikki propulsiojärjestelmät ovat AC-AC ratkaisuja eli vaihtovirtageneraattorilla syötetään vaihtovirtapotkurimoottoria. Pyörimisnopeuden säätö tapahtuu taajuusmuuttajalla.

Pienitehoisissa potkurikäytöissä esimerkiksi trusterimoottoreina käytetään taajuusmuuttajalla ohjattuja epätahtikoneita. Suurempitehoisissa potkurikäytöissä käytetään puolestaan taajuusmuuttajalla ohjattuja tahtimoottoreita. Näille tahtimoottoreille on ominaista suhteellisen pieni pyörimisnopeus, alle 300 1/min ja suuri vääntömomentti pienillä pyörimisnopeuksilla. Tällainen käyttö soveltuu erityisen hyvin syklokonvertterisyöttöiselle (suora taajuusmuuttaja) tahtimoottorille. Tahtimoottoria ohjataan myös välipiirillä varustetuilla taajuusmuuttajilla. Näitä ovat perinteinen, isotehoisissa tahtikonekäytöissä käytetyt kuormakommutoiva vaihtosuuntaaja (LCI) sekä jännitevälipiirillä varustettu suoraan vääntömomentin säätöön perustuva taajuusmuuttaja (DTC).

Syklokonverterilla ohjatut potkurikäytöt

1980 –luvulla Srömberg julkaisi uuden mullistavan syklokonverterikäytön, jota voitiin käyttää uusissa jäänmurtaajissa. Nykyään syklokonverteriohjattu tahtimoottori on yleisin potkurimoottorikäyttö erityisesti suurissa laivoissa. Taloudellisuutensa ja erinomaisten käyttöominaisuuksiensa vuoksi syklokonverterilla ohjattuja tahtimoottoreita on asennettu paljon myös suuriin loistoristeilijöihin. Näille syklokonverterilla ohjatuille tahtimoottorikäyttöille ovat tyypillisiä seuraavat ominaisuudet:

- pyörimisnopeusalue 70 - 300 rpm,
- tehoalue 5 MW - 20 MW,
- pyörimisnopeuden säätö,
- suunnanvaihto mahdollinen,
- esimerkiksi jäänmurtaajissa suuri vääntömomentti tarpeen pienillä pyörimisnopeuksilla,
- neliöllinen vastamomentti. (Mantere, 1995).

Potkurimoottoreita on kahden tyyppisiä: perinteinen potkurimoottori ja Azipod –ruoripotkuri. Perinteisessä potkurimoottorikonseptissa tahtimoottorilla muodostettu mekaaninen teho välitetään laivan potkurille pitkän akselin välityksellä. Kvaerner Masa-Yards:n ja ABB Industry Oy:n kehittämässä Azipod –potkurimoottorikonseptissa tahtimoottori sijaitsee laivan alla olevassa podissa. Tämä suomalaisen insinööritoimiston taidonnäyte, Azipod –ruoripotkuri, otettiin ensimmäisen kerran käyttöön 1990 –luvulla.

Vaikka näissä kahdessa eri potkurimoottorikonseptissa teho- ja pyörimisnopeusalue ovatkin usein samoja, itse tahtimoottorit ovat mekaaniselta rakenteeltaan hyvin erilaisia. Azipod –ruoripotkurimoottorit ovat rakenteeltaan pitkiä, koska veden alla olevan podin halkaisija ei saa kasvaa virtausteknisistä syistä liian suureksi. Tavalliset potkurimoottorit ovat puolestaan normaalikokoisia tahtimoottoreita. Tästä johtuen potkurikäyttöjen moottoreita mitoittaessa on perinteisiä potkurimoottoreita ja Azipodeja käsiteltävä eri sovelluksina. Varsinaista potkurikäyttöjen mitoittamista käsitellään tarkemmin kappaleessa kolme.

Jännitevälipiirillisellä taajuusmuuttajalla ohjatut potkurikäytöt

Myös jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat ovat viime vuosina yleistyneet tahtikonekäyttömarkkinoilla. Etenkin metalliteollisuuden sovelluksissa DTC –ohjaukseen perustuvat jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat ovat yleisiä. Nyt myös laivojen suurissa tahtikonekäytöissä voidaan käyttää jännitevälipiiritäajuusmuuttajia. Tämä otetaan myös kehitettävän mitoitusohjelman kehityksessä huomioon, sillä taajuusmuuttajan valinnalla on vaikutus myös itse tahtimoottorin mitoittamiseen. Jännitevälipiirillisestä taajuusmuuttajasta lisää kappaleessa 3.3.

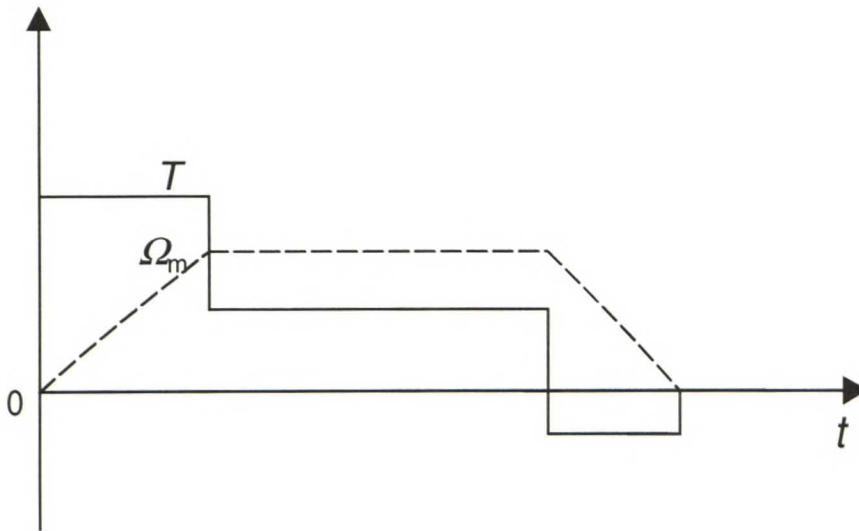
2.2.2 Nostolaitteikäytöt

Nopeussäädettyjä tahtimoottoreita käytetään myös suurta tehoa vaativissa nostolaitesovelluksissa. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi kaivoshissit. Kaivoshissisovellukset ovat vaativimpia nopeussäädettyjä sovelluksia, joissa vaaditaan jopa satojen tonnin nostokapasiteettia. Kaivoshissien tulee olla erittäin varmatoimisia ja luotettavia. Hissisovelluksissa tahtikoneiden tehoalue on yleensä 2 – 10 MW ja pyörimisnopeusalue 40 – 970 1/min. Hissiltä vaaditaan suurta momenttia koko pyörimisalueella. (Mantere, 1995).

Hissin toiminta voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen, kiihdytys, vakionopeus, jarrutus ja lepotila, kuva 2.2. Lisäksi hissiltä vaaditaan suunnanvaihtoja eli hissimoottorien tulee toimia kaikissa neljässä kvadrantissa (Luomi, 2002). Kiihdytysvaiheessa momentti voi olla kaksinkertainen nimellismomenttiin nähden. Moottorin mitoitus tehdään kuitenkin moottorilta vaaditun keskimääräisen momentin mukaan, koska kiihdytyksen huippumomentin aikana moottori ei ehdi lämpenemään liiaksi moottorin pitkien lämpenemäaikavakioiden takia.

Tyypillisiä nostolaitteikäyttöjen ominaisuuksia ovat:

- Luotettavuus ja toimintavarmuus,
- suuri momentti koko pyörimisnopeusalueella,
- 4- kvadranttikäyttö.



KUVA 2.2 Kuvassa on tyypillinen nostolaitteikäytön momentti ja pyörimisnopeus ajan funktiona.

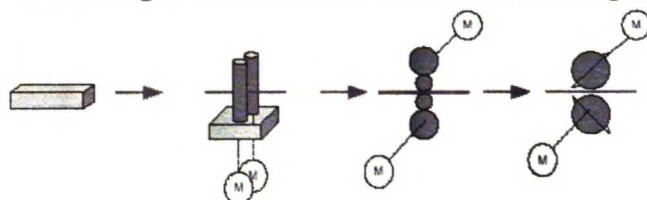
2.2.3 Valssaimet

Metalliteollisuudessa valssikäyttöillä käsiteltävää materiaalia kuljetetaan telojen tai rullien välissä sitä samalla puristaen. Useimmiten metallinauhoja ja -levyjä valmistetaan valssaamalla. Suuritehoisia tahtimoottoreita käytetään muun muassa kuumavalssauslinjojen pääkäyttöinä, karkea-, nauha- ja levyvalssaimissa (Kyyrä 2001). Karkeavalssauksessa käytetyt valssikäytöt ovat usein vaihtosuuntaisia eli valssattavaa materiaalia ajetaan edestakaisin valssin läpi samalla valssausväliä pienentäen kunnes valmistettava nauha tai levy on halutun paksuista. Karkeavalssin moottorilta vaaditaan suurta tehoa ja vääntömomenttia. Lisäksi valssimoottoreille asetetut säätödynaamiset vaatimukset ovat hyvin suuret. Etenkin valssauksen ensimmäisessä pistossa moottorilta vaaditaan vääntömomentin nousua nolasta noin 200 – 300 prosenttiseen nimelliseen vääntömomenttiin noin 50 – 200 millisekunnissa. Tyypillisen karkeavalssin nimellisteho on noin 5 – 10 MW:n alueella eli ensimmäisen piston aikana moottorin teho voi nousta yli 10 MW. Kuvassa 2.3 on kuvasarja erään valssaimen toiminnasta.

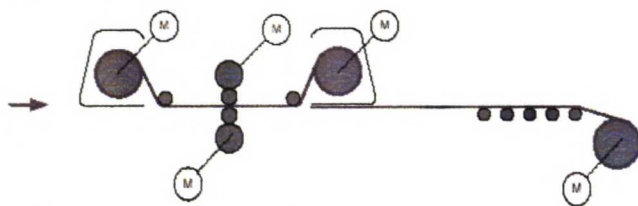
Tyypillisiä valssimoottorilta vaadittavia ominaisuuksia:

- pyörimisnopeus alue 30 – 1500 rpm
- TOP0 –tyyppinen (vakiomomentti-vakioteho-käyttö),
- laaja vakiotehoalue,
- nopea momentin ja nopeuden säätö koko tehoalueella, myös ylikuormilla
- 4 –kvadranttikäyttö
- ylikuormitettavuus, ylikuormat 200 – 300%.

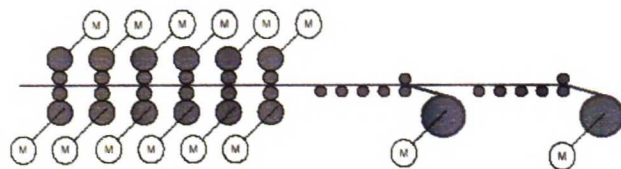
Vaihe 1: Edger -leikkuri, karkeavalssain, harkonpääleikkuri



Vaihe 2: levyvalssain



Vaihe 3: peräkkäisvalssain



KUVA 2.3 Esimerkki eräästä kuumavalssauslinjasta (Hot rolling mill train), joka koostuu monesta erillisestä vaiheesta. (LÄHDE: ACS 6000SD Product Catalog).

3 Suuritehoisten tahtimoottoreiden taajuusmuuttajat

Moottorikäytöissä taajuusmuuttajan lähtöjännitteeltä vaaditaan sekä taajuuden että lähtöjännitteen ohjattavuutta. Taajuus- ja jänniteohjeet saadaan käytön ohjaus- ja säätöpiireiltä. Taajuutta muuttamalla vaikutetaan moottorin pyörimisnopeuteen ja jännitettä muuttamalla magnetointitilaan. Taajuusmuuttajien ohjaus- ja säätömenetelmät voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- Skalaariohjaus ja skalaarisäätö
- Vektorisäätö
- Käämivuon ja vääntömomentin suora säätö (DTC)

Skalaarisäätö

Skalaariohjauksessa moottoria ohjataan periaatteella $U / f = \text{vakio}$. Skalaarisäädössä ohjataan käämivuon ja staattorivirran itseisarvoja pysyvän tilan yhtälöiden mukaisesti. Syöttötaajuus määrätään roottorin asennosta riippumatta. Tällainen roottorin asennosta riippumaton ohjaus johtaa huonoon säätödynamiikkaan. Taajuutta on muutettava hyvin hitaasti, koska liian nopeissa taajuuden muutoksissa syntyy heilumisilmiö, jolloin napakulman muutokset voivat olla liian suuria ja moottori putoaa tahdistä. Esimerkiksi epätahtikoneen pumppu- ja puhallinkäyttöihin skalaarisäätö soveltuu hyvin.

Vektorisäätö

1980-luvulla kehitys johti vektorisäädön käyttöönottoon taajuusmuuttajissa. Vektorisäätöä käytetään, kun halutaan nopea ja tarkka säätö. Vektoriohjauksen tavoitteena on staattorivirran vektorin tarkka ohjaaminen vuokoordinaatistossa. Vektorisäädössä pyritään muodostamaan sellaiset virtaohjeet, että magnetointia ja sähköistä vääntömomenttia voidaan ohjata toisistaan riippumatta. Tahtimoottorin vektorisäätö tarvitsee roottorin asennon mittauksen. Vektorisäädöllä ei kuitenkaan aina päästä riittävän tarkkaan ja nopeaan momentin säätöön.

Suora vääntömomentin säätö (DTC)

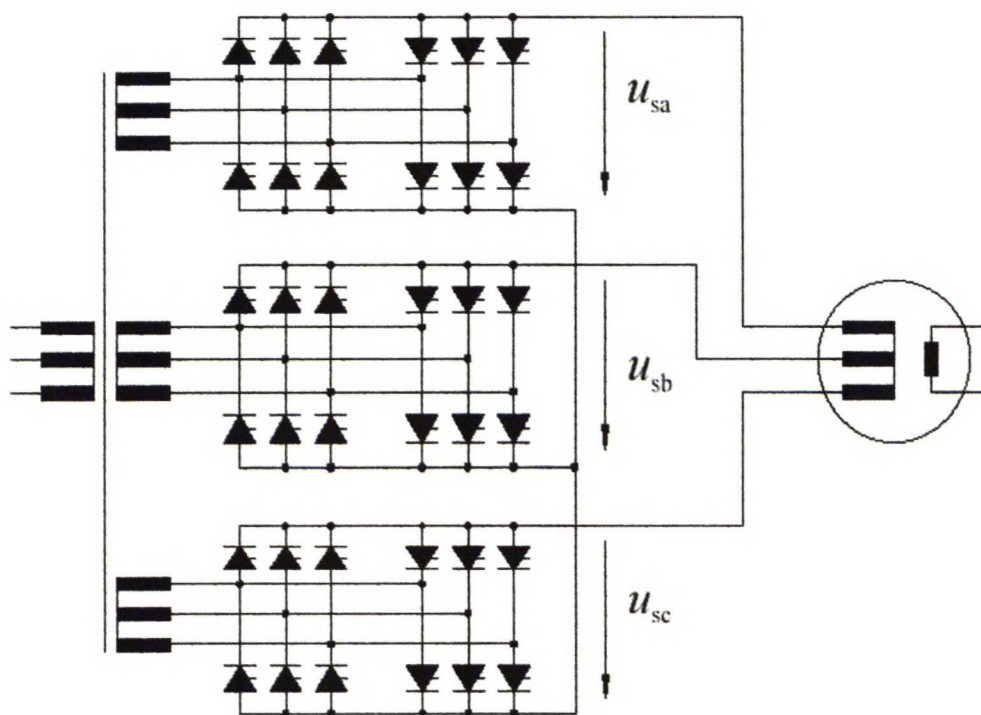
Taajuusmuuttajien viimeisin kehityskaskel on ollut suora vääntömomentin säätö, DTC. 1990 –luvun puolivälissä ABB:n lanseeraama säätömenetelmä on yleiskäyttöinen, takaisinkytkemätön säätömenetelmä, joka kattaa 95 % teollisuuden säätökäyttösovelluksista (Heinonen, 2000). Tosin tahtimoottorin DTC –säätö tarvitsee tiedon roottorin asennosta, jolloin tarvitaan pulssianturia sen mittaamiseen. Suoraan vääntömomentin säätöä tutkimme tarkemmin kappaleessa 3.3.2.

Syklokonvertteri ja jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja tarjoavat parhaat mahdollisuudet tahtimoottorin ohjaukseen. Kummankin avulla voidaan toteuttaa vektoriohjaus. LCI –käytön vektoriohjaus poikkeaa niistä oleellisesti. Tässä luvussa tutustutaan eri taajuusmuuttajaratkaisuihin ja niiden erityispiirteisiin tahtikonekäytöissä. Yleisimpiä tahtimoottoreiden ohjaukseen käytettyjä taajuusmuuttajia ovat syklokonvertterit ja DTC-ohjatut jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat. Myös kuormakommutoiva taajuusmuuttaja esitellään, vaikka LCI –käytön mitoittamiseen ei tässä työssä perehdytä tarkemmin.

3.1 Syklokonvertteri

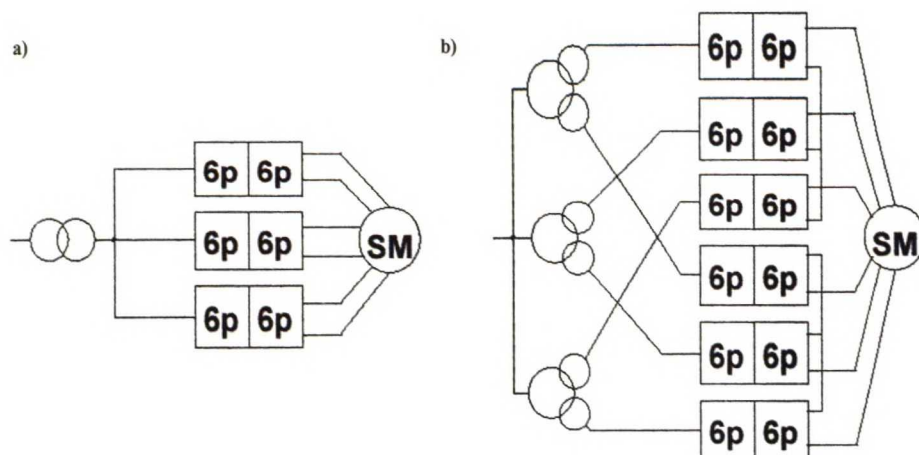
Syklokonvertteri on niin sanottu suorataajuusmuuttaja eli lähtöjännitteen taajuutta ja amplitudia muutetaan ilman välillä olevaa tasasähkövälipiiriä. Yksivaiheisesta vaihtovirrasta muodostetaan vaihtovirtaa kahta vastarinnankytkettyä tavallisesti kuusipulssista tyristorisiltaa ohjaamalla. Syöttövirtaa pätkitään, jolloin voidaan muuttaa lähtövirran taajuutta sekä amplitudia.

Kolmivaiheinen syklokonvertteri toteutetaan kolmella vastarinnankytketyllä yleensä 6-pulssisella tyristorisillalla eli yksi vastarinnan kytketty tyristorisilta syöttää aina yhtä moottorin vaihetta. Kuvassa 3.1 on esitetty kytkentä, joka on yleisin tahtimoottorin ohjauksessa käytetty kytkentä. Tässä kytkennässä syklokonvertterivaiheiden a, b ja c syötöt ovat toisistaan galvaanisesti erotettuja. Syklokonvertteri voi olla myös 3-, 12-, tai jopa 24-pulssinen. 12-pulssisissa syklokonvertterissa jokaista vaihetta kohden on kaksi vastarinnankytkettyä siltaparia, jotka on kytketty sarjaan. Tällöin tehopuolijohteiden lukumäärä kasvaa kuitenkin 36:sta 72:een. Suuremmalla pulssiluvulla saavutetaan parempi säädettävyys, tasaisempi vääntömomentti sekä pienempi yliaaltosisältö.



KUVA 3.1 Syöttömuuntajalla varustettu syklokonvertteri ja tahtimoottori tähteen kytkettynä (Y).

Suuritehoisten tahtimoottoreiden staattorikäänitys rakennetaan kahdesta erillisestä käämistä. Kumpaakin käämistä syötetään erillisellä 6-pulssisella syklokonvertterilla. Näin kahdella taajuusmuuttajalla voidaan syöttää kaksikertaa tehokkaampaa moottoria. Kytkentä on niin sanottu YY –kytkentä (kaksoistähti). Kuvassa 3.2 on sekä 6, että 12-pulssisen syklokonvertterin ja kahdella erillisellä staattorikäänityksellä varustetun tahtimoottorin kytkentä. Tällainen on yleinen kytkentä Azipod – ruoripotkurimoottoreissa. Jotta saavutetaan maksimaalinen turvallisuus, kumpaakin staattoria ohjaavat omat syklokonvertterit.



KUVA 3.2 Kuvassa a) on 6-pulssisen syklokonvertterin ja kahdella erillisellä staattorikäädillä varustetun tahtimoottorin kytkentä. Kuvassa b) on vastaava tilanne 12-pulssisen syklokonvertterin tapauksessa.

Kuten jo aiemmin tässä luvussa on mainittu syklokonvertteri soveltuu hitaasti pyöriviin sovelluksiin. Syklokonvertterin verkkokommutoinnin takia sen lähtötaajuus rajoittuu noin 40 %:iin syöttöverkon taajuudesta eli 50 Hz syöttötaajuudella saadaan maksimissaan noin 20 Hz lähtötaajuus. Esimerkiksi potkurimoottorikäytöissä napaluku p on yleensä 6, jolloin pyörimisnopeus on enintään 240 1/min. Tämä sopii hyvin laivakäyttöihin, sillä suurella hitaasti pyörivällä potkurilla on parempi hyötysuhde.

Syklokonvertterikäytössä moottorin tehokerroin säädetään aina ykköseksi. Itse konvertteri puolestaan kuluttaa niin sanottua ohjausloistehoa syöttöverkosta. Ohjausloistehon vuoksi syklokonvertterin tehokerroin on aina induktiivinen ja se muuttuu jännitteen funktiona. Siniohjauksella tehokerroin on noin 0,73...0,75. Jännitteen alentuessa ja ohjauksuhteen pienentyessä tehokerroin laskee nopeasti. Tämä on otettava huomioon tahtimoottorin eri toimintapisteitä laskettaessa.

3.1.1 ACS 6000 C

ACS 6000C on ABB:n syklokonvertterimalli. Yleisimmin sitä käytetään suuritehoisissa tahtikonekäytöissä. Taulukkoon 3.1 on koottu kyseisen taajuusmuuttajan teknisiä tietoja, joita tarvitaan tahtimoottoria mitoittaessa syklokonvertterikäyttöön.

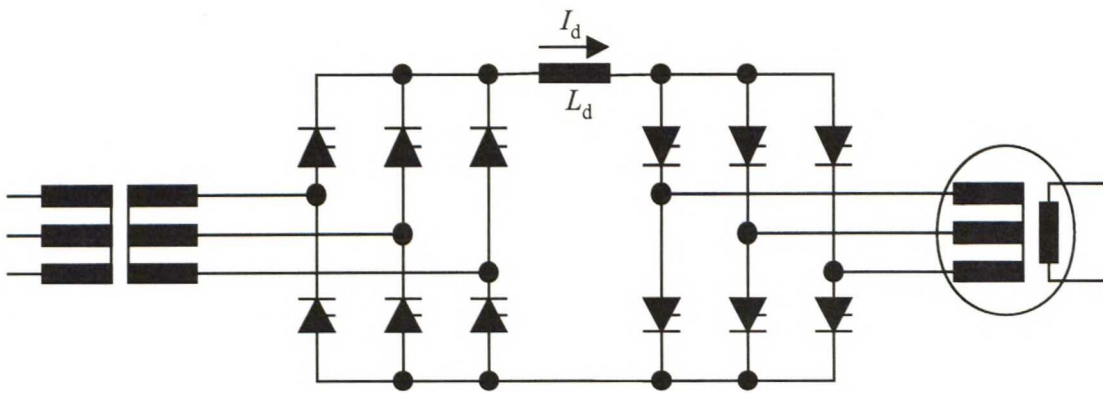
TAULUKKO 3.1 Syklokonvertterin ominaisuuksia. (Lähde: ABB Schweiz AG, 2001)

ACS 6000C taajuusmuuttaja	
Tehoalue	1...27 MW
Lähtötaajuusalue	0...24/28 Hz (50 / 60 Hz syöttöverkossa)
Lähtöjännitevaihtoehdot	3 x 1000 V(AC), 1500 V(AC), 1800 V(AC), 3000 V(AC) \pm 10 %
Tehokerroin	noin 0,76 (ind.)

Yleisimmin käytettyjä syklokonverttereita ovat 1500 ja 1800 voltin versiot. Metalliteollisuuden syklokonvertterikäyttöjen moottorit mitoitetaan yleensä 1500 voltin jännitteelle. Laivakäytöissä käytetyimmät jännitteet ovat 1570 ja 1840 voltia. Yleensä laivakäyttöjen syklokonvertterilla ohjatut tahtimoottorit mitoitetaan siten, että ne kompensoivat mahdollisimman paljon syklokonvertterin ottamaa loistehoa verkosta.

3.2 Kuormakommutoiva suuntaaja (LCI)

Kuormakommutoiva suuntaaja on rakenteeltaan yksinkertaisin verrattuna muihin tahtimoottoreiden ohjaukseen käytettyihin taajuusmuuttajaratkaisuihin. Kuormakommutoiva vaihtosuuntaaja on virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja. Sen osia ovat verkkokommutoiva tasasuuntaaja, virtavälipiirin tasoituskuristin sekä kuormakommutoiva vaihtosuuntaussilta. Kuormakommutoiva taajuusmuuttaja on toteutettu pelkillä tyristoreilla. Kuvasta 3.3 voimme havaita edellä mainitut LCI – taajuusmuuttajan osat tahtikonekäytössä. Vaihtosuuntaajan tyristorien sammuttamiseen käytetään kuormana olevan tahtikoneen kehittämää vastasähkömotorista voimaa. Tämän takia tahtikoneen on oltava ylimagnetoituna, jotta se pystyy tuottamaan kommutoinnin vaatiman loistehon. Koska LCI-käyttö vaatii kuormalta kapasitiivisen tehokertoimen, oikosulkumoottori ei sovellu kyseiseen käyttöön.



KUVA 3.3 Kuormakommutoiva suuntaaja tahtikonekäytössä.

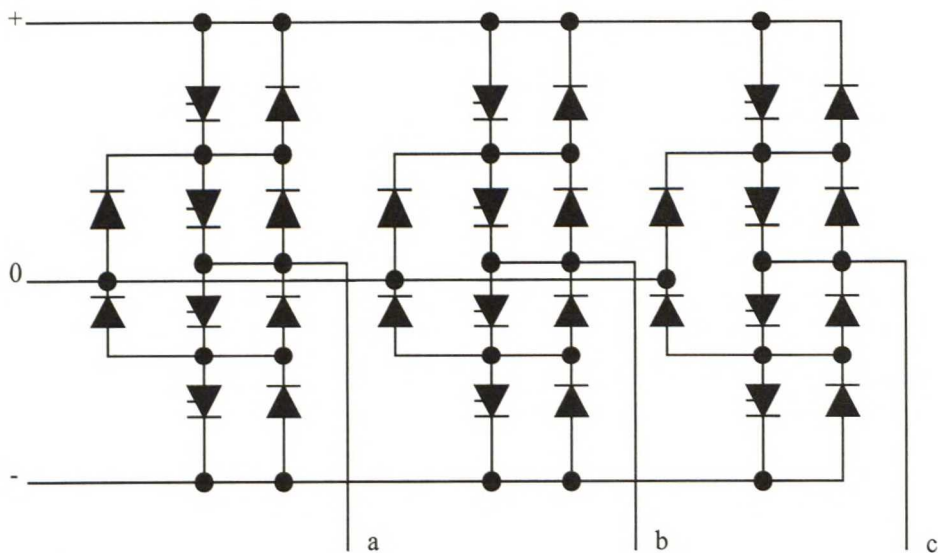
Toimittaessa käytön nimellinopeudella kuormakommutoivan suuntaajan tehokerroin on lähellä ykköstä (noin 0,9), mutta pyörimisnopeuden laskiessa myös tehokerroin alkaa laskea. LCI –käytön ongelmana on toiminta pienillä pyörimisnopeuksilla. Esimerkiksi kuormakommutoidun käytön käynnistäminen on hankalaa, koska käynnistyksen alussa ei löydy riittävää jännitettä kuorman puoleisen suuntaajan kommutointiin. Tästä johtuen pienillä pyörimisnopeuksilla (alle 5-10 % nimellinopeudesta) ohjataan verkon puoleisen suuntaajan virta nolleen tyristorien sammumisen varmistamiseksi. Tämä johtaa siihen, että myös vääntömomentti on nolla kommutoinnin aikana, mikä puolestaan aiheuttaa akselivärähtelyjä ja ääni-ilmiöitä. Muita haittapuolia ovat säätödynamiikan hitaus, kommutointilovet ja momentin yliaallot pienillä nopeuksilla.

Edellä mainittujen haittapuolien vuoksi LCI-käyttö soveltuu säätödynamiikaltaan vaatimattomiin käyttöihin. Käyttökohteita ovat esimerkiksi pumppu- ja puhallinkäytöt, joissa toimitaan harvoin pienillä nopeuksilla ja vastamomentti käynnistyksen aikana on pieni. Kuormakommutoivilla suuntaajilla on mahdollista toteuttaa erittäin suuritehoisia käyttöjä. Sarjaankytkennöillä on toteutettu jopa yli 100 MW tehoisia käyttöjä (Pyrhönen, 2001). Koska nykyään tehoalueella 1-50 MW keskijännitekäytöissä käytetään suhteellisen harvoin kuormakommutoivia suuntaajia, ei tässä työssä tulla käsittelemään tarkemmin tahtimoottorin mitoittamista LCI-käyttöihin.

3.3 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja

Aiemmin jännitevälipiirillisiä käyttöjä on esiintynyt epätahtimootorikäytöissä, joilla päästään noin 5 MW:n tehoon. Vahvan tuotekehityksen tuloksena on muutaman viime vuoden aikana ilmestynyt markkinoille myös suurempitehoisiin tahtimootorikäyttöihin soveltuvia jännitevälipiirillisiä taajuusmuuttajia (Puolanne, 2000). Sovellusalueena on ollut pääasiassa metalliteollisuuden valssainkäytöt, isotehoiset vinssit ja nosturit. Nyt on myös laivoihin tulossa jännitevälipiirillisiä potkurikäyttöjä.

Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan tehot ovat yleensä olleet alhaisempia kuin LCI- tai syklokonvertertikäyttöjen. Suuritehoiset jännitevälipiiritaajuusmuuttajat ovat kaksitasoisia tai kolmetasoisia. Kaksitasoiset invertterit toteutetaan yleensä IGBT –transistoreista, joilla päästään 690 V jännitteellä noin 5 MW tehoon. Tahtimootorikäytöissä käytetään kolmitasoinvertteriä. Ne toteutetaan IGCT tai GTO –tyristoritekniikalla. Tällä tekniikalla päästään jännitekestoisuudessa keski-jännitealueelle (2400/3300 V) ja tehoa saadaan noin 1-10 MVA. Lisätehoa saadaan taajuusmuuttajien rinnankytkennöillä jolloin päästään jopa 27 MVA tehoon. Kuvassa 3.4 on esitetty kolmitasoinvertterin peruskyskentä.



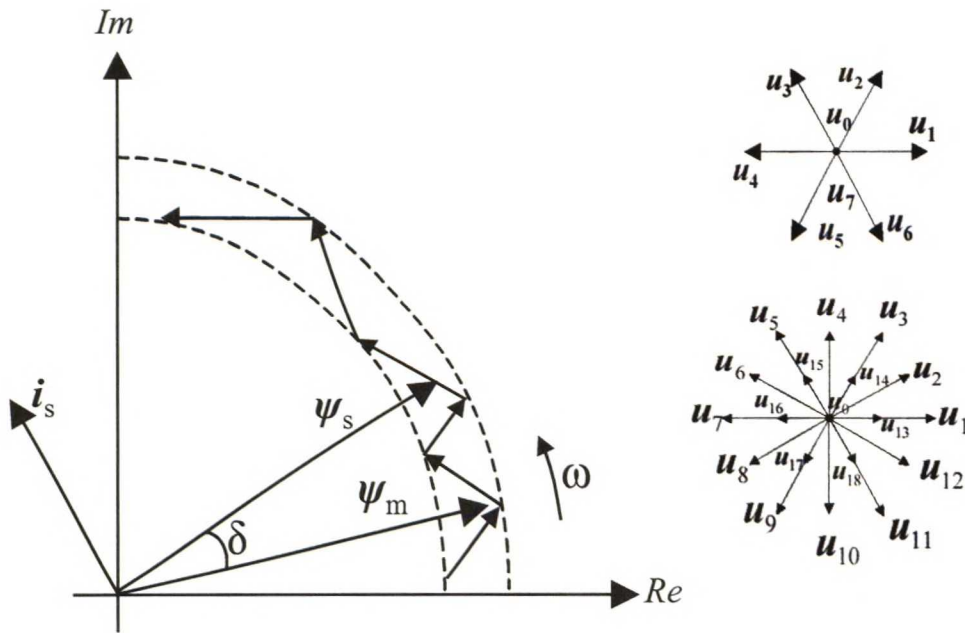
KUVA 3.4 Kolmitasoisien niin sanotun NPC-invertterin piirikaavio on kuvattu pääpiirteissään. Nimitys kolmi- tai kaksitasoinvertteristä seuraa siitä, että invertterityypeissä kukin moottorille menevä vaihejohdin voidaan kytkeä joko kolmeen tai kahteen eri potentiaaliin. Kolmitasoisessa invertterissä vaihtoehdot ovat +, 0 tai -, ja kaksitasoisessa + tai -.

NPC-PWM tekniikalla toteutettu taajuusmuuttaja on erittäin hyvä vaihtoehto suuritehoisten tahtimootoreiden ohjauksessa, jossa käytöltä vaaditaan hyvää säädettävyyttä. NPC-invertterin jännite muistuttaa enemmän siniaaltoa verrattuna tavalliseen 2-tasoinvertteriin, joten siinä on pienempi yliaaltosisältö.

3.3.1 Suora vääntömomentin säätö (DTC)

Nykyään ABB:n valmistamat jännitevälipiiritaajuusmuuttajat ovat lähes kaikki DTC – ohjattuja. 1980 –luvulla saksalainen Manfred Depenbrock ja japanilaiset Takahashi ja Nogushi julkaisivat suoraan Faradayn induktiolakiin perustuvan menetelmän, jossa moottorin käämivuota ohjataan suoraan jännitteellä (Pyrhönen, 2001). Ohjauksen periaatteena on pitää käämivuon ja vääntömomentin oloarvot tiettyjen hystereesirajojen sisäpuolella valitsemalla tilanteeseen sopiva jännitevektori. Invertterin jokaisen kytkimen kääntö tutkitaan erikseen. DTC –ohjauksessa yhdistetään vuo-orientointi, vuosaatto, virtasaatto ja PWM. Hystereesirajoilla eli kaksipistesäädöllä mahdollistetaan nopea käämivuon säätö ja siten saadaan vääntömomentti muuttumaan mahdollisimman nopeasti. (Luomi, 2002).

Kuvan 3.5 oikeassa reunassa on esitetty kaksi- ja kolmitasoinvertterin jännitevektorit. Kaksitasoinvertterillä on käytössä 8 jännitevektoria ja kolmitasoinvertterillä on yhteensä 27 jännitevektoria. Jännitevektoreiden valinnoilla voidaan vaikuttaa suoraan käämivuohon sekä vääntömomenttiin. Jännitevektorit ja niiden käyttöajat valitaan siten, että vuon lisäksi vääntömomentti pysyy kaksipistesäädön määrittämien hystereesirajojen sisäpuolella. Vääntömomentti on verrannollinen staattorin ja roottorin käämivuovektorien välisen kulman suuruuteen. Siten vääntömomenttia voidaan ohjata nopeasti staattorin käämivuovektoria kiihdyttämällä tai hidastamalla.



KUVA 3.5 Havainnollistetaan tahtikoneen DTC –säätöä. Tahtikoneen tapauksessa staattorivirta on kohtisuorassa staattorin käämivuohon nähden. Kuvan tapauksessa toimitaan lähellä kentänheikennysaluetta. Tämä voidaan nähdä siitä, että säädössä käytetään pitkiä jännitevektoreita. Koneen pyöriessä hitaasti esiintyy useammin nollavektoreita (u_0, u_7).

3.3.2 ACS 6000 SD

ABB:n suuren teholuokan jännitevälipiiritaajuusmuuttajat kuuluvat ACS 6000 –sarjaan, kuten syklokonvertterikin. Taajuusmuuttajat valmistetaan Sveitsissä ABB Industrie AG:ssa. Vaihtosuuntaajan osalta jännitevälipiiritaajuusmuuttaja pohjautuu DTC – ohjaukseen ja IGCT –puolijohdeteknologiaan. ACS 6000AD soveltuu epätahtimoottoreiden ja ACS 6000SD tahtimoottoreiden ohjaukseen. Tässä kappaleessa selvitetään ACS 6000SD taajuusmuuttajan ominaisuuksia ja raja-arvoja. Seuraavassa luvussa (4) tutkitaan esitettyjen ominaisuuksien vaikutusta ohjattavan tahtimoottorin mitoitukseen.

Jännitevälipiiritaajuusmuuttaja (INU – Inverter Unit) koostuu erillisistä moduuleista, joita ovat verkon puoleinen tasasuuntaaja, tasajännitevälipiiri sekä moottorin puoleinen vaihtosuuntaaja. Lisäksi taajuusmuuttajan säätö voidaan laskea omaksi moduuliksi. Tavallisesti verkonpuolella käytetään dioditasasuuntaajaa (LSU – Line Supply Unit). Mikäli halutaan nelikvadranttikäyttö eli jarrutuksen aikana halutaan syöttää tehoa verkkoon päin, verkon puoleisena suuntaajana käytetään samanlaista ohjattua siltaa kuten moottoripuolella (ARU –Active Rectifier Unit).

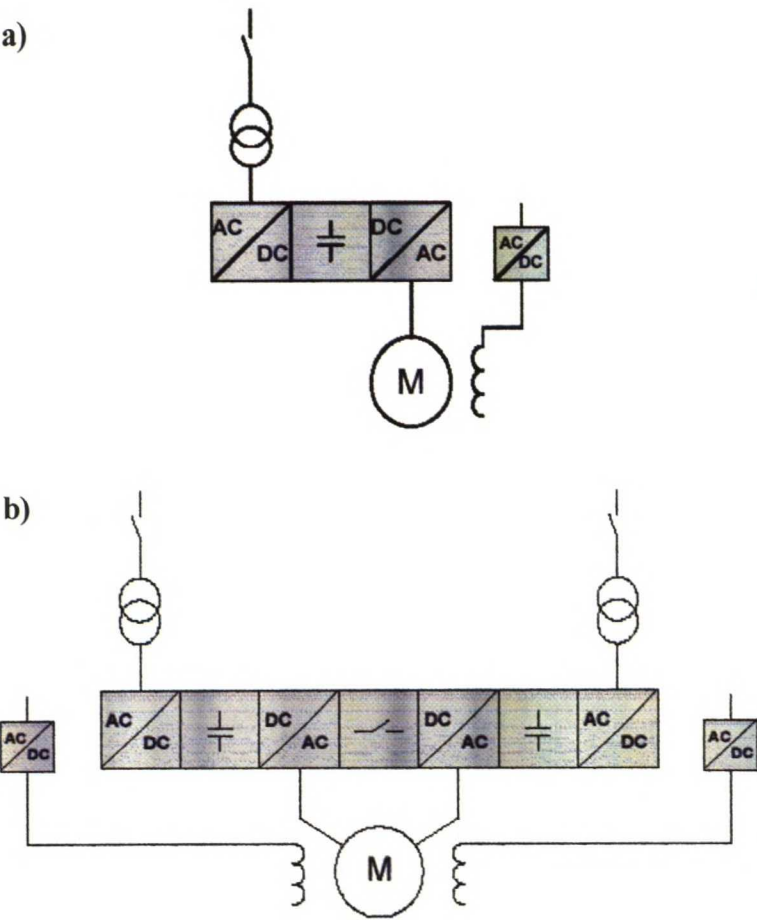
Taulukossa 3.2 on esitelty ACS 6000SD –taajuusmuuttajan eri versioiden ja kytkentöjen maksimi-arvoja. Tahtimoottori, jota kyseisellä taajuusmuuttajalla ohjataan, tulee mitoittaa siten, että taajuusmuuttajan maksimi-arvot eivät ylitä missään käyttötilanteessa. ACS 6000SD:llä ohjatut moottori mitoitetaan yleensä 3100 tai 3150 voltin jännitteelle.

TAULUKKO 3.2 Maksimi-arvot (Lähde: ACS 6000SD:n tekniset spesifikaatiot)

ACS 6000 SD taajuusmuuttaja					Magnetointi	
Tyyppi	P _{max} [MVA]	U _{max} [V]	I _{max} [A]	f[Hz]	U _{max} [V]	I _{max} [A]
A06_1s7	7	3160 (3300)	1280	0-75	380-690	375 / 675*
L12_1s7	7	3000 (3100)	1300	0-75	380-690	375 / 675*
A12_2s7	2x7	3160 (3300)	2x1280	0-75	380-690	375 / 675*
L24_2s7	2x7	3000 (3100)	2x1300	0-75	380-690	375 / 675*
A06_1s9	9	3160 (3300)	1650	0-75	380-690	375 / 675*
L12_1s9	9	3000 (3100)	1670	0-75	380-690	375 / 675*
A12_2s9	2x9	3160 (3300)	2x1650	0-75	380-690	375 / 675*
L24_2s9	2x9	3000 (3100)	2x1670	0-75	380-690	375 / 675*
Taulukon selitteet:						
A06_1sX: 3-taso invertteri, missä on syöttöverkon puolella ohjattava tasasuuntaaja.						
L12_1sX: 3-taso invertteri, missä on syöttöverkonpuolella 12-pulssinen diodisilta.						
A12_2sX: Kaksi rinnankytkettyä 3-tasoinvertteriä, missä on syöttöverkon puolella ohjattava tasasuuntaaja.						
L24_2sX: Kaksi rinnankytkettyä 3-tasoinvertteriä, missä on syöttöverkonpuolella 12-pulssinen diodisilta.						
X: kuvaa invertteristä saatavaa tehoa (yksikkö: MVA)						
* 375 A (r.m.s.) (harjaton magnetointi) / 675 A (r.m.s.) (harjallinen magnetointi)						

ACS 6000SD taajuusmuuttajia löytyy 7 ja 9 MVA:n tehoille. Mikäli käytöstä halutaan tehoa enemmän kuin 9 MVA, ohjauksessa on käytettävä taajuusmuuttajien rinnankytkentöjä (Multi-drive). Näin taajuusmuuttajasta saadaan esimerkiksi 2x7 tai 2x9 MVA:n teho. Tällä hetkellä jännitevälipiirilliselle 6000SD –taajuusmuuttajalle luvataan maksimissaan 3x9 MVA:n eli 27 MVA:n teho.

Moottorin ja taajuusmuuttajan kytkentä riippuu paljon sovelluksesta ja sen tarvitsemasta tehosta. Kuvassa 3.6 on esitetty erilaisia ACS 6000SD –taajuusmuuttajan ja tahtimoottorin kytkentävaihtoehtoja. Mikäli sovelluksen ottama maksimi teho on alle 9 MVA riittää moottorin ohjaukseen yksi taajuusmuuttajayksikkö (Single-Drive). Tällöin kytkentä on kuvan 3.6 a) mukainen. Käytöissä, missä sovelluksen tarvitsema maksimiteho ylittää 9 MVA tarvitaan enemmän kuin yksi taajuusmuuttaja. Näiden käyttöjen tahtimoottoreilla on kaksi erillistä staattorijärjestelmää, joita syötetään erillisillä taajuusmuuttajilla. Kuvan 3.6 b) mukainen kahden staattorijärjestelmän kytkentä on yleinen valssikäytöissä ja laivojen potkurikäytöissä. Potkurikäytöissä kaksi erillistä staattorijärjestelmää ovat yleensä vielä 30° -asteen vaihesiirrossa, jotta käyttö olisi mahdollisimman redundantti eli varmennettu.



KUVA 3.6 ACS 6000SD –taajuusmuuttajan ja tahtimoottorin kytkentä a) yhden staattorijärjestelmän ja b) kahden staattorijärjestelmän tahtimoottorissa.

4 Nopeussäädetyt tahtimoottorin mitoitus

4.1 Yleistä

Tahtikoneiden suunnittelun tavoitteena on kehittää asiakkaan tarpeet täyttäviä kestäviä koneita. Koneiden tulee olla valmistushinnaltaan mahdollisimman edullisia. Myös luovutuksen jälkeen käyttö- sekä huoltokustannusten on oltava alhaisia. Tämän lisäksi kone pitää toimittaa sovitussa aikataulussa ja ennen kaikkea sen tulee täyttää sille asetetut tekniset ja mahdolliset muut erikoisvaatimukset.

Yleisesti sähkömagneettisten laitteiden suunnittelu voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen, joita ovat sähköinen, terminen sekä rakennetekninen mitoitus. Sähkökoneen suunnittelussa nämä osa-alueet jakautuvat kuvan 3.7 mukaisesti.



KUVA 4.1 Sähkökoneen suunnittelun eri osa-alueita. (Lähde: Arkkio, 2003)

Sähkötekniinen mitoitus määrää koneen suorituskyvyn. Sähkömagneettisen laitteen sähköinen mitoittaminen koostuu magneettipiirin eli magneettivuon kulkutien mitoittamisesta, virtapiirien eli käämitysten suunnittelemisesta sekä eristeiden mitoittamisesta. Terminen mitoittaminen sisältää lämmönvirtausten sekä jäähdytyksen suunnittelemisen. Rakennetekninen mitoittaminen koostuu puolestaan pitkistä listasta eri suunnittelu- ja tarkastuskohteita, kuten esimerkiksi roottori, akseli, staattori, laakerointi, runko, kokoonpano jne. Tässä työssä ei kuitenkaan keskitytä sähkökoneen rakennetekniseen suunnitteluun. Yleensä kaikki edellä esitetyt suunnitteluosiot ovat voimakkaasti toisistaan riippuvaisia. Erityisesti sähköinen ja terminen mitoitus ovat vahvasti korrelaatioissa keskenään. Tämän takia sekä sähköisen että termisen mitoituksen tekee usein sama henkilö, sähkösuunnittelija.

Nykyään nopeussäädetyt tahtimoottorit yleistyvät kovaa vauhtia. Tämä on tuonut mukanaan uusia haasteita tahtikoneen mitoituksessa. Tässä luvussa käydään aluksi läpi yleisesti tahtimoottorin sähköisen ja termisen mitoittamisen periaatteita. Tutustutaan koneen valintaan vaikuttaviin tekijöihin. Etenkin on tutkittu taajuusmuuttajan vaikutuksia mitoitukseen ja määritetty sen pohjalta mitoituksen raja-arvoja. Nämä raja-arvot ovat myös implementoitu nopeussäädettyjen tahtikoneiden mitoitusohjelmaan tässä työssä. Kun on käyty periaatteet läpi, tutustutaan kokonaisuudessa tahtimoottorin mitoitusprosessiin. Tämä antaa käsityksen siitä, mitä toimintoja ja ominaisuuksia seuraavassa kappaleessa esiteltäviltä mitoitus- ja myyntitukiohjelmilta vaaditaan.

4.2 Mitoituksen peruslähtökohdat

4.2.1 Perusyhtälöt

Sähkökone mitoitetaan aina tietylle teholle. Yhteys magneettipiiriin eli rautasydämen ja sähköpiiriin eli käämien välille saadaan indusoituvan jännitteen yhtälöstä, Faradayn induktiolaista.

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \tag{4.1}$$

Usein sähkökone mitoitetaan tietylle jännitteelle, jolloin on parempi käyttää yhtälöä muodossa, mistä saadaan ratkaistua magneettipiiriin vuo.

$$\psi = N \cdot \Phi = \int u(t) dt \tag{4.2}$$

Sinimuotoisesti vaihtelevalle jännitteelle saadaan yhtälön 4.2 integraali ratkaisemalla yhtälö muotoon.

$$N \cdot \hat{\phi} = \frac{\hat{u}}{\omega} \tag{4.3}$$

Ja edelleen jännitteeksi saadaan,

$$U = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \hat{\phi} \tag{4.4}$$

missä

ω	indusoituvan vuovaihtelun kulmataajuus
N	sarjaankytkettyjen käämikierrosten lukumäärä
$\hat{\phi}$	sinimuotoisen indusoivan vuon huippuarvo

Kolmivaiheisen sähkökoneen näennäisteho saadaan puolestaan yhtälöstä.

$$S = 3 \cdot U \cdot I = 3 \cdot \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \hat{\phi} \cdot I \tag{4.5}$$

Sähkömoottorin yhteydessä mitoitus tehdään yleensä pätötehon, P mukaan, jolloin on otettava huomioon myös tehokerroin, $\cos \varphi$. Tosin tahtimoottorin tapauksessa tehokerroin säädetään usein ykköseksi. Pätötehoksi saadaan tällöin.

$$P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 3 \cdot \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \hat{\phi} \cdot I \cdot \cos \varphi \tag{4.6}$$

Edellä esitettyä tehon yhtälöä voidaan käyttää kaikkien sähkökonetyyppien mitoituksessa. Yksinkertaisesta tehon yhtälöstä näemme, että sähkökoneen teho on

verrannollinen indusoituneen vuon taajuuteen ja amplitudiin sekä sähköpiirissä kulkevaan virtaan.

Käytännössä sähkökoneen mitoituksessa rautasydämessä kulkevan magneettikentän suuruutta kuvaavana suurena ei käytetä vuota vaan vuontiheyttä, B . Vuontiheyden suuruus rajoittuu sydänmateriaalin, käytännössä sähkölevyn ominaisuuksiin.

$$B = \frac{\Phi}{A_{\Phi}} \quad (4.7)$$

Sähköpiirin käämityksessä kulkevan virran suurena käytetään usein virrantiheyttä, jonka suuruus on riippuvainen muun muassa sallitusta lämpenemästä ja jäähdytysolosuhteista.

$$J = \frac{I}{A_1} \quad (4.8)$$

Sijoittamalla vuon- ja virrantiheydet yhtälöön 4.6 saadaan pätötehon yhtälöksi,

$$P = 3 \cdot \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot \hat{b} \cdot A_{\Phi} \cdot J \cdot A_1 \cdot \cos \varphi \quad (4.9)$$

missä

\hat{b}	vuontiheyden huippuarvo
J	virrantiheys
A_{Φ}	tehollinen vuopinta-ala
A_1	tehollinen virtapinta-ala.

Koska pyöriville sähkökoneille magneettiapiirin määräävin osa on ilmaväli, voidaan tehollinen vuopinta-ala määrittää likimäärin ilmaväliahkaisijan, D perusteella.

$$A_{\Phi} = \pi \cdot D^2 \quad (4.11)$$

Pyörivälle sähkökoneelle virtarasitus voidaan määritellä myös virtakatteen A avulla. Virtakate voidaan ratkaista yhtälöstä,

$$A = \frac{J \cdot A_1}{h_{\Phi}} \quad (4.12)$$

missä h_{Φ} on virran vaikutusalueen leveys, joka on pyörivälle sähkökoneelle kehän eli staattorin pituus, L_1 .

Pätötehon yhtälöksi saadaan ($\cos \varphi = 1$),

$$P = 3 \cdot \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot \hat{b} \cdot A \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L_1 = f \cdot C \cdot V_{\Phi} \quad (4.13)$$

missä

$$C = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \hat{b} \cdot A \quad \text{on konevakio} \quad (4.14)$$

$$V_{\Phi} = 3 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L_1 \quad \text{on vuotien tilavuus} \quad (4.15)$$

Sähkökoneen mitoittamisessa konevakio C antaa tehon ja tilavuuden riippuvuuden. Konevakio kertoo sen, kuinka tehokkaasti roottoritulavuus on käytetty hyväksi. Konevakio kasvaa, kun koneen teho kasvaa (Jokinen, 1982). Sen suuruus määräytyy käytännössä kokemuseräisesti. Siihen vaikuttavat koneen rakenneratkaisut, käytetyt materiaalit, jäähdytysominaisuudet ja ympäristöolosuhteet.

Yhtälöstä 4.13 voidaan edelleen ratkaista pyörivän sähkökoneen likimääräinen vääntömomentti seuraavasti,

$$T = \frac{P}{2\pi \cdot n} = C \cdot D^2 \cdot L_1 \quad (4.16)$$

missä konevakio on kolmivaiheiselle pyörivälle sähkökoneelle

$$C = \frac{3}{2} \cdot p \cdot B \cdot A \quad (4.17)$$

p on napapariluku

B on vuontiheys

A on virtakate

Kuten voimme kaavoista 4.9 ja 4.16 havaita, sähkömoottorin tuottaman vääntömomentin T rajoittavia tekijöitä ovat magneettivuontiheys koneen magneettipiirissä sekä virrantiheys koneen käämeissä. Nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoituksessa vuontiheysrajat saadaan peruskoneelta¹ ja käämien lämpenemä rajoitetaan virrantiheysrajoilla. Toinen tapa olisi laskea lämpenemä lämpöverkon avulla. (Luomi, 2001).

4.2.2 Lämpenemä

Sähkömoottorin valinta tehdään kahden sen toiminnan kannalta tärkeän suureen, vääntömomentin ja lämpenemisen perusteella (Aura & Tontteri, 1985). Sähkömoottoria käytettäessä syntyy häviöitä, jotka ilmenevät moottorin lämpenemisenä. Moottorin suurimman sallitun lämpötilan määrittää sähkömoottorin eristyksen lämmönkestoisuus. Eristysten lämmönkestoisuuden ilmoittamista varten on olemassa eristysluokat eli lämpöluokat, joita IEC:n (IEC 34-1 ja IEC 85) normien mukaan on olemassa A-, B-, F- sekä H-luokka. Eristeen kestävä maksimilämpötila tarkoittaa eristyksen kuumimman kohdan lämpötilaa. Käämityksen lämpötila mitataan resistanssimittauksella, jolloin sallittu maksimilämpötila on käämin keskimääräinen lämpötila. Lämpöluokkien suurimmat sallitut lämpötilat ovat taulukossa 4.1. Maksimilämpötilat vaihtelevat muun muassa kyseessä olevan standardin mukaan.

¹ Peruskone on kone, joka on todettu hyväksi ratkaisuksi (katso kappale 4.4 Raja-arvot).

TAULUKKO 4.1 Lämpöluokkien suurimmat sallitut lämpötilat (Lähde: IEC 60034-1)

Lämpöluokka	Maksimilämpötila resistanssimittauksella (°C)	Eristeen kestävä maksimilämpötila (°C)
A	100	115
B	120	135
F	140	155
H	165	180

Taajuusmuuttajalla ohjattujen teollisuuskäyttöjen eristykset tehdään useimmiten lämpöluokkaan F. Yleensä metalliteollisuuden säätökäyttömoottorit mitoitetaan kuitenkin lämpöluokkaan B. Näin moottoreille saadaan ylimääräinen kuormitus- tai elinikäreservi käämitykselle. Tämä mahdollistaa esimerkiksi sen, että moottorille voidaan sallia F-luokan lämpenemä määritellyillä ylikuormilla. (Paloniemi, 1990).

Ympäristöolosuhteet vaikuttavat moottorille sallittuun lämpenemään. Ympäristön lämpötila tai lämmönvaihtimen kautta kulkevan jäähdyttävän aineen lämpötila yhdessä lämpöluokan kanssa määrittävät moottorin suurimman sallitun lämpenemän. Tahtimoottoreissa jäähdyttävänä aineena kierrätetään usein ilmaa.

Suurin sallittu lämpenemä voidaan laskea seuraavasti

$$dT_{\max} = T_{\max} - T_{\text{ambient}} \tag{4.18}$$

tai lämmönvaihtimella varustetun moottorin tapauksessa

$$dT_{\max} = T_{\max} - T_{\text{inletair}} \tag{4.19}$$

missä

- dT_{\max}
 T_{\max}
 T_{ambient}
 T_{inletair}
 T_{coolant}
 dT_{ic}

on koneelle sallittu maksimi lämpenemä,

on lämpöluokan sallima maksimilämpötila resistanssimittauksella,

on ympäristön lämpötila,

on moottorin sisään johdetun jäähdytysilman lämpötila, joka puolestaan on $T_{\text{inletair}} = T_{\text{coolant}} + dT_{\text{ic}}$.

on lämmönvaihtimen jäähdytysaineen lämpötila ja

on lämmönvaihtimen jäähdytysaineen ja moottoriin sisään menevän ilman lämpötilojen erotus.

Myös koneen asennuskorkeus vaikuttaa moottorin lämpenemään. Ilman tiheys pienenee korkeuden funktiona, jolloin ilman jäähdyttämän pinnan lämmönsiirtokerroin huononee. Korkeuden vaikutus otetaan huomioon, jos moottorin asennuskorkeus on yli 1000m merenpinnan yläpuolella. IEC:n (taulukon 4.2) mukaan suurin sallittu lämpenemä vähenee noin 1 %/100m. Taulukossa on oletettu, että ympäristön lämpötila on 40 °C. (IEC 60034-1).

TAULUKKO 4.2 Korkeuden vaikutus lämpenemärajoihin (Lähde: IEC 60034-1)

Korkeus (m)	Lämpöluokka		
	130 (B)	155 (F)	180 (H)
	Suurin sallittu lämpenemä (K)		
1000	80	100	125
2000	72	90	113
3000	64	79	100
4000	56	69	88

4.2.3 Vääntömomentti ja teho

Mitoitettavasta sähkömoottorista halutaan useimmiten tietty mekaaninen vääntömomentti. Toisin sanoen moottorin nimellispiste mitoitetaan halutulle akseliteholle tietyllä pyörimisnopeudella. Moottori mekaanisella teholla P_m ja pyörimisnopeudella n kehittää mekaanisen vääntömomentin T_m . Eli vääntömomentti saadaan tehon ja pyörimisnopeuden suhteesta seuraavasti.

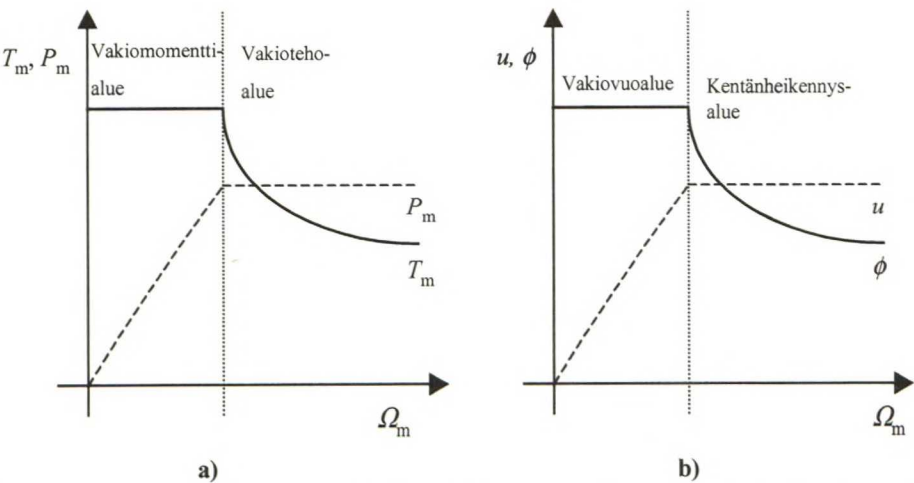
$$T_m = \frac{P_m}{\Omega_m} = \frac{60 \cdot P_m}{2\pi \cdot n} \tag{4.20}$$

Pyörimisnopeus n riippuu moottorille syötetyn jännitteen tai virran taajuudesta sekä moottorin napapariluvusta alla olevan kaavan mukaisesti.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [1/min]} \tag{4.21}$$

Tahtimoottorin akseli pyörii tahtinopeudella sen pyörivään magneettikenttään nähden. Nopeussäädetyin moottorin taajuutta muutetaan halutun kierrosnopeuden mukaan. Pyörimisnopeutta voidaan säätää vapaasti taajuusmuuttajan määräämällä taajuusalueella.

Sähkömoottorin vääntömomentti ja teho käyttäytyvät alla esitetyn kuvan 4.2 a) mukaisesti. Moottorin pyöriessä nimellisnopeudella jännite on nimellisarvossaan. Mikäli moottoria halutaan pyörittää nimellisnopeutta suuremmalla pyörimisnopeudella, on koneen vuota pienennettävä kääntäen verrannollisena pyörimisnopeuteen.



KUVA 4.2 Kuvassa a) vääntömomentti T sekä mekaaninen akseliteho P_m sekä kuvassa b) vuo ja jännite, kun sähkömoottoria kuormitetaan nimellisvirralla.

Nimellispisteessä jännite on saavuttanut nimellisarvonsa, jolloin moottori pyörii nimellisellä pyörimisnopeudella. Kohdan 4.2 kuvissa moottorin nimellispiste on katkoviivalla merkityssä kohdassa. Kuvassa 4.2 b nimellisnopeus jakaa moottorin nopeusalueen vakiovuoalueeseen ja kentänheikennysalueeseen. (Luomi, 2001).

Nopeussäädettyjen moottoreiden tulee toimia monessa toimintapisteessä koko taajuusalueella. Moottorit ovat TOP0 –tyyppisiä eli toiminta-alue jakautuu vakiomomentti- ja vakiootehoalueeseen, kuten kuvassa 4.1 a. Tällöin koneen mitoitus tehdään kentänheikennyspisteessä, jolloin moottorin virrat ja vuot ovat maksimissaan. Vakiovuoalueella eli kentänheikennyspisteen alapuolella staattorijännite laskee ja roottorivirta sekä vuontiheydet pysyvät vakiona. Kentänheikennysalueella eli kentänheikennyspisteen yläpuolella roottorivirta ja vuontiheydet laskevat.

Kentänheikennysalueesta on eniten hyötyä käytöissä, joilta vaaditaan isoa irtiotto- tai kiihdytysmomenttia pienillä nopeuksilla ja pienempää vääntömomenttia maksiminopeudella. Tällaisia käyttäjiä ovat esimerkiksi kelaimet, rullaimet, laivojen potkurimoottorit sekä valssaimet. Tästä tarkemmin seuraavassa kappaleessa, missä tutkitaan vastamomentin vaikutusta mitoitukseen.

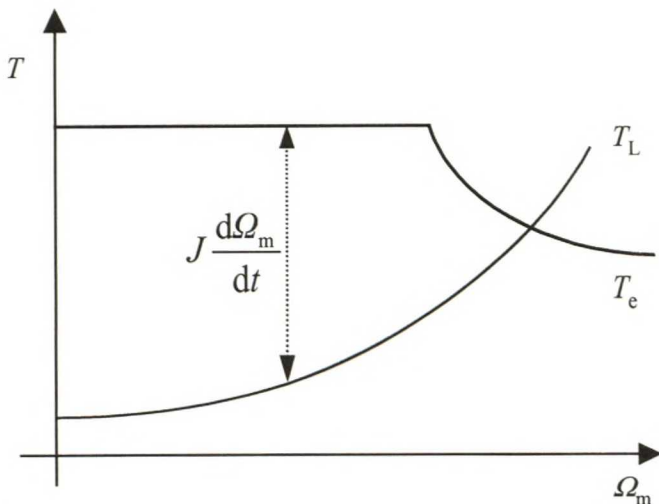
4.2.4 Vastamomentti

Mitoituksen lähtökohtana on myös sovelluksen vastamomenttikäyrä. Moottorilta vaadittava momentti määräytyy vastamomentin sekä muiden suorituskykyvaatimusten mukaan. Yksinkertaisinta ja useimmiten riittävää on varmistua siitä, että moottorin kehittämä vääntömomentti on koko pyörimisnopeusalueella suurempi kuin kuormituksen vääntömomentti eli vastamomentti. (Aura & Tontteri, 1985).

Tyypillisiä kuormitusmomenttikäyrätyyppejä ovat:

- neliöllinen momentti
- vakiomomentti
- laskeva momentti
- jaksollisesti vaihteleva momentti. (INSKO, 1986).

Yksi yleisimpiä vastamomentti riippuvuuksia on kuvan 4.5 mukainen neliöllinen vääntömomenttikäyrä, T_L . Usein liikennevälinekäytöissä, kuten laivan potkurikäytöissä on neliöllinen vastamomentti. Lisäksi niissä on usein kiihdytysmomenttivaatimuksia tai esimerkiksi valssikäytöissä tarvitaan suurta irtiottomomenttia. (Niiranen, 1999)



KUVA 4.3 Neliöllinen vastamomenttikäyrä.

4.2.5 Ylikuormat

Avonapaiset tahtimootorit soveltuvat isoille nimellistehoille ja –vääntömomenteille. Niillä on myös erinomainen ylikuormitettavuus ja säätödynamiikka laajalla pyörimisnopeusalueella. Usein nopeussäädetyissä tahtimootorikäytöissä on erilaisia ylikuormavaatimuksia riippuen sovelluksesta. Moottoria ylikuormittamalla on mahdollista saavuttaa lyhytaikaisesti suurempia vääntömomenteja. Ylikuormittamista rajoittavat moottorin lämpenemä, sähkömagneettiset tekijät sekä taajuusmuuttaja. (Niiranen, 1999), (Luomi, 2001).

Metalliteollisuuden nopeussäädetyt tahtimootorikäytöt mitoitetaan yleensä lämpöluokkaan B ja sen lisäksi moottorille sallitaan erilaisia ylikuormia lämpöluokkaan F. Usein käytön kuormitus tapahtuu syklistesti. Ylikuormat voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään:

- jatkuva ylikuorma (Continuos)
- jaksollisesti toistuva ylikuorma (Frequent)
- satunnainen lyhytaikainen ylikuorma (Occasional)

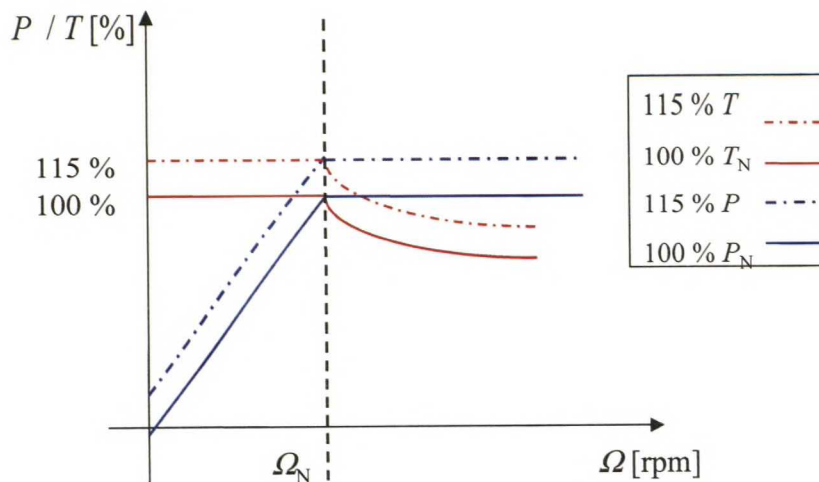
TAULUKKO 4.3 Tyypillisiä metalliteollisuuskäytön ylikuormavaatimuksia.

Ylikuorma [% T_n]	Ylikuorman tyyppi ja kesto
100 %	jatkuva, lämpenemä B-luokassa
115 %	jatkuva, lämpenemä F-luokassa
125 %	2 tuntia, lämpenemä F-luokassa
175 %	jaksollisesti toistuva (2 minuuttia)
200 %	satunnainen (1 minuutti)
250 %	satunnainen (10 sekuntia)
275 %	(cut off)

Moottoria mitoitettaessa on otettava huomioon pahin mahdollinen kuormitustilanne, jonka mukaan moottori on suunniteltava. Vakiomomenttialueella moottorista otetaan nimellismomenttia suurempi momentti ja vakiotehoalueella moottorista otetaan nimellistehoa suurempi teho kuten kuvassa 4.4. Yleensä moottoria syötetään jännitelähteestä, jolloin moottorin virta muuttuu kuormituksen mukaan. Toisin sanoen ylikuormalla moottori ottaa nimellisvirtaa suuremman virran. Moottoria mitoitettaessa ylikuormille tärkeintä on se, että moottori pystyy tuottamaan vaaditun ylikuormian ilman ylikuumenemista.

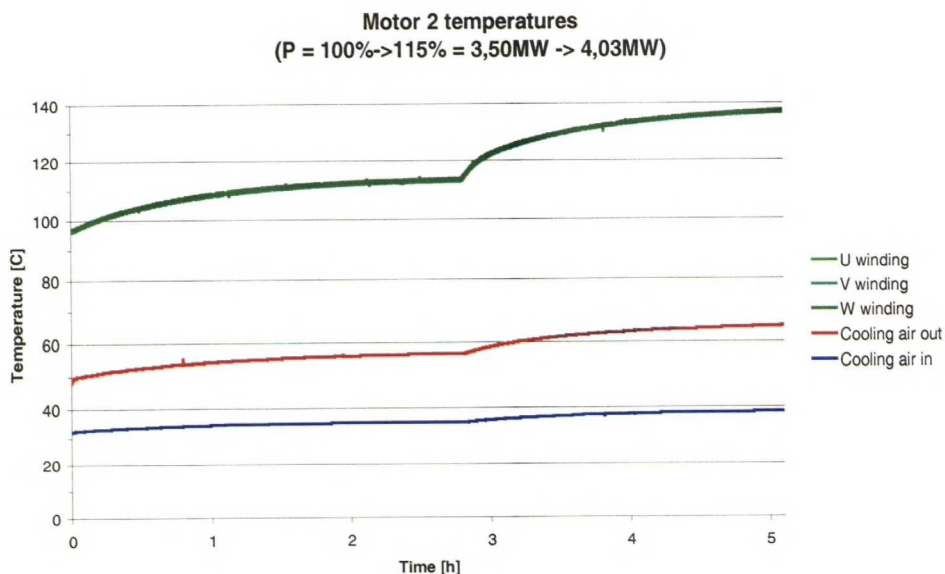
Jatkuva ylikuorma

Jatkuva ylikuormitus on tässä yhteydessä jatkuva käyttö, jonka kuormitus on nimelliskuormaa suurempi. Kuormitus pysyy vakiona niin kauan, että kuormituksesta johtuvat lämpötilamuutokset ehtivät tasoittua. Kuvassa 4.4 on moottorin nimellismomentti ja –teho pyörimisnopeuden funktion. Lisäksi kuvassa on 115 % :n jatkuvan ylikuormian vaatima moottorin teho ja vääntömomentti.



KUVA 4.4 Jatkuva ylikuorma pyörimisnopeuden funktiona.

Metalliteollisuuden moottorit mitoitetaan usein siten, että ne kestävät esimerkiksi 115 % jatkuvan ylikuorman lämpöluokassa *F* eli moottorin suurin sallittu lämpötila on 140 °C. Kuvassa 4.5 on erään koestetun nopeussäädetyin moottorin lämpenemäajan tulokset. Moottorin nimellisteho on 3,5 MW lämpöluokassa *B*, kun moottorista otetaan 115 % teho sen lämpenemä pysyy lämpöluokassa *F*.



KUVA 4.5 Esimerkkinä erään koestetun moottorin lämpenemäajan tulokset, missä 3 h ajan jälkeen moottorista on otettu 115 %:n nimellisteho.

Jaksollisesti toistuvat ylikuormat

Yleisesti metalliteollisuuden nopeussäädettyjen moottoreiden nimellisteho mitoitetaan käytön vaatiman keskimääräisen tehon mukaan. Jaksollisesti toistuvat ylikuormat esiintyvät käytöissä, joissa kuormitus pysyy tietyn ajan vakiona. Kuormitus aika on kuitenkin niin lyhyt, että lämpenemä ei saavuta vakiona pysyvää loppuarvoa ja lämpötila pysyy lämpöluokassa *F*. Jokaista kuormitusjaksoa seuraa tyhjäkäyntijakso, jonka aikana moottorin lämpötila laskee. Myös jaksollisesti toistuvat ylikuormat voidaan mitoittaa keskimääräisen ylikuorman vaatiman tehon mukaan. Kuormitusjakso on tyypillisesti noin 1-3 minuuttia pitkä 140-180 % nimellisteholla ja tyhjäkäyntijakso

on 2 - 5 min. Liitteessä 1 on kuva jaksollisesti toistuvan ylikuorman teho, häviöteho sekä lämpenemä ajan funktiona.

Satunnaiset lyhytaikaiset ylikuormat

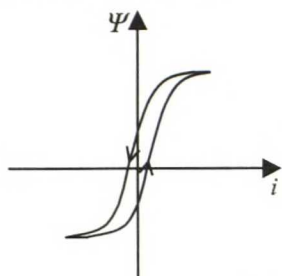
Lyhytaikaisen ylikuorman oletetaan esiintyvän harvoin. Lyhytaikaisessa ylikuormassa kuormitus pysyy ilmoitetun ajan muuttumattomana. Aika on niin lyhyt, että lämpenemä ei saavuta vakiona pysyvää loppuarvoa. Ylikuormaa seuraa pitkä tyhjäkäyntijakso, jonka aikana moottorin lämpötila ehtii laskea takaisin B -luokan sallimalle lämpötila-alueelle. Yleensä lyhytaikaiset ylikuormat ovat 10 - 60 s pitkiä 200 - 250 % nimellisteholla.

4.3 Häviöt ja jäähdytys

Sähkömoottorin lämpenemisen aiheuttamat häviöt voidaan jakaa rauta-, kupari-, hankaus- sekä tuuletushäviöihin. Lisäksi häviöt voidaan jakaa sekä staattorille että roottorille erikseen. Tahtikoneen roottorissa syntyviä kuparihäviötä kutsutaan magnetointihäviöiksi. Avonapaisen tahtikoneen roottorissa on usein vaimennuskäämitys, missä syntyy myös häviöitä. Hankaushäviöt ovat lähinnä laakereiden ja harjallisessa koneessa myös harjojen kitkasta aiheutuvia häviöitä. Tuuletushäviöt ovat tahtimoottorin tapauksessa usein erillisestä jäähdyttimestä syntyviä lisähäviöitä. Tässä yhteydessä perehdytään lähemmin vain staattorissa ja roottorissa syntyviin sähkömagneettisiin häviöihin.

4.3.1 Rautahäviöt

Ajallisesti vaihteleva magneettikenttä aiheuttaa rautahäviöitä sähkömoottorin rautaosissa. Rautahäviöt muodostuvat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä. Hystereesihäviöt syntyvät, kun moottorin magneettikentänmuutos aiheuttaa muutoksen raudan magneettiseen tilaan. Kuvassa 4.4. olevan raudan hystereesisilmukan kiertämisessä kuluu energiaa, joka on verrannollinen silmukan pinta-alaan. Jaksollisesti vaihtelevassa magneettikentässä hystereesihäviöt ovat likimain suoraan verrannollisia taajuuteen sekä vuontiheyden neliöön. Hystereesihäviöt ilmenevät staattorin ja roottorin levysydämien lämpenemisenä.



KUVA 4.6 Rautasydämen hystereesisilmukka, jossa käämivuon muutos on esitetty käämissä kulkevan virran funktiona.

Vaihteleva magneettikenttä indusoi lisäksi pyörrevirtoja magneettivuon läpäisemiin johtaviin osiin. Rautaan jakautuneiden virtojen aiheuttamat pyörrevirtahäviöt ovat verrannollisia taajuuden f ja vuontiheyden huippuarvon B neliöön (Niemenmaa, 2001). Magneettivuon indusoimia pyörrevirtoja esiintyy staattorin ja roottorin rautasydämissä, käämeissä, runkorakenteissa ja mahdollisesti myös laakereissa.

Avonapaisessa tahtikoneessa rautahäviöitä esiintyy staattorin rautalevyissä sekä roottorin napojen pinnalla, napakengässä. Roottorin napavarressa rautahäviöt ovat pienet, koska napakäämit magnetoidaan tasavirralla.

4.3.2 Kuparihäviöt

Sähkömoottorin kuormitusvirta synnyttää virtalämpöhäviöitä, jotka vaikuttavat eniten moottorin lämpenemiseen. Moottorin käämeissä kulkeva virta lämmittää käämityksiä sekä staattorissa, että roottorissa. Häviöt syntyvät käämin resistanssissa. Kupari käämityksessä kulkevan virran aiheuttamaksi häviötehoksi saadaan

$$P_{Cu} = \frac{\rho_{Cu}(T) \cdot l_{Cu}}{A_{Cu}} \cdot I^2, \tag{4.22}$$

missä

I

on virta,

$\rho_{Cu}(T)$

on kuparin ominaisresistanssi lämpötilassa T ,

l_{Cu}

on kuparijohtimen pituus

A_{Cu}

on kuparin pinta-ala.

Johtimen resistanssiksi saadaan

$$R = \frac{\rho_{Cu}(T) \cdot l_{Cu}}{A_{Cu}} \tag{4.23}$$

ja edelleen kuparihäviöt saadaan yhtälöstä

$$P_{Cu} = R \cdot I^2 \tag{4.24}$$

4.3.3 Jäähdytys

Moottorissa syntyvä häviöteho muuttuu lämmöksi moottorin rakenteissa. Osa lämpöenergiasta varastoituu moottorin massaan ja osa siirretään jäähdytyksen avulla ympäristöön. Kun moottorin lämpötila on saavuttanut vakiona pysyvän loppuarvonsa, siirtyy koko häviöiden aiheuttama lämpöenergia jäähdytyksen avulla ympäristöön tai lämmönvaihtimen jäähdytysaineeseen. (Aura & Tontteri, 1985).

Lähes kaikki tahtimoottorit jäähdytetään ulkoisten lämmönvaihtimien avulla. Lämmönvaihtimella jäähdytetään moottorin sisälle johdettua jäähdytysilmaa. Pienemmissä koneissa lämmönvaihtimen jäähdytysaineena on yleensä ilma ja suurempitehoisissa käytetään yleensä vettä (ABB Oy, 2000). Yleisimpiä tahtimoottoreiden IEC-standardin 60034-6 mukaisia jäähdytystapoja ovat:

TAULUKKO 4.4 Tahtimoottoreiden yleisimmät jäähdytystavat

IC-luokka	Epävirallinen kuvaus
IC4A	Kanavatuuletus, missä on suljettu, sisäinen ilmanvirtaus.
IC6A	Ilma-ilma-lämmönvaihdin, suljettu, sisäinen ilmanvirtaus. Lämpö johdetaan ulkoisen lämmönvaihtimen kautta ulkopuoliseen ilmaan.
IC8A	Vesi-ilma-lämmönvaihdin, suljettu, sisäinen ilmanvirtaus. Lämpö johdetaan ulkoisen lämmönvaihtimen kautta jäähdytysveteen.

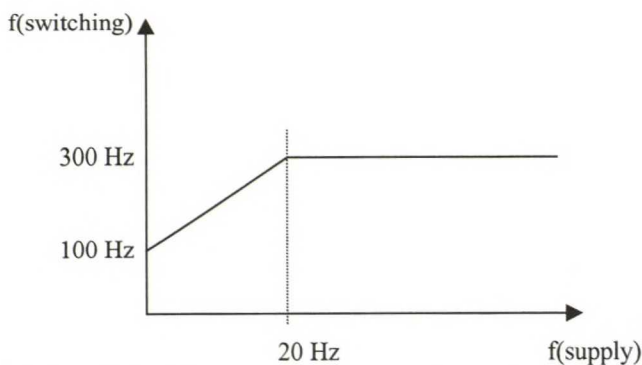
4.3.4 Taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt

Nopeussäädettyjä tahtimootoreita syöttävät taajuusmuuttajat aiheuttavat lisähäviöitä. Taajuusmuuttajan jännite/virta ei ole sinimuotoista vaan se sisältää perusaallon lisäksi joukon yliaaltoja, jotka synnyttävät lisähäviötä moottorin käämityksissä. Taajuusmuuttajalla ohjattua moottoria mitoitettaessa on hyvin tärkeää tietää taajuusmuuttajan aiheuttamien lisähäviöiden suuruus sekä tarkka sijainti moottorissa. Mikäli taajuusmuuttajan vaikutusta ei oteta mitoitusvaiheessa huomioon, saattaa moottorissa esiintyä paikallisia ylikuumenemispisteitä. Pahimmassa tapauksessa ylikuumat kohdat saattavat vaurioittaa eristyksiä. Tässä kappaleessa keskitytään ACS 6000SD –taajuusmuuttajan aiheuttamiin lisähäviöihin tahtimootorissa.

Lisähäviölaskenta vaatii nykyaikaisia laskentamenetelmiä. Laskentaan tarvitaan ohjelma, jolla voidaan generoida taajuusmuuttajan jännitemalli. Tässä työssä simuloinneissa käytetyt DTC -ohjatun kolmitasoinvertterin jännitemallit generoitiin C-language DTC-simulator –nimisellä ohjelmalla, joka on kehitetty viitteessä esitetyn mallin pohjalta (Burzanowska, 1990). Tahtimootorin simuloinnit on toteutettu elementtimenetelmään (FEM – Finite Element Method) perustuvalla numeerisella laskentaohjelmalla, FCSMEK:illa. Liitteessä 2 on kuvat FCSMEK -simuloinneissa käytetystä kolmitasoinvertterin pääjännitteestä sekä erään lasketun koneen vaihevirroista.

ACS 6000SD, virtaväre

Kuten liitteestä 2 voimme havaita, ACS 6000SD –taajuusmuuttajalla ohjatun moottorin vaihtojännite koostuu monesta erillisestä jännitepulssista. Jännitepulssien pituudet muuttuvat taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden mukaan. ACS 6000SD –taajuusmuuttajan kytkentätaajuus riippuu halutun lähtöjännitteen taajuudesta kuvan 4.7 mukaisesti. Taajuusmuuttajan aiheuttama virtaväre syntyy puolestaan moottorin käämeissä. Taajuusmuuttajalla ohjatun tahtimootorin virtaväreeseen kytkentätaajuuden lisäksi vaikuttaa moottorin alkutilan induktanssi, L'' . Alkutilan induktanssin suuruuteen vaikuttavat tahtimootorin kaikki käämit.



KUVA 4.7 ACS 6000SD taajuusmuuttajan kytkentätaajuus syöttötaajuuden funktiona. (Lähde: ACS 6000 – spesifikaatio, ABB:n sisäinen)

Hieman yksinkertaistaen voidaan ajatella, että ACS 6000SD:n syöttöjännite on vakio DC-jännitelähde, joka kytketään äkillisesti induktiiviseen kuormaan. Yksittäinen jännitepulssi voidaan olettaa äärettömän nopeaksi, jolloin jännitteen muutosnopeus, du/dt , ei vaikuta virran muutosnopeuteen, di/dt . Tällöin virran muutosnopeus voidaan määrittää seuraavasti:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{DC} - mmv}{L''} \quad (4.25)$$

Virran muutosnopeus vaikuttaa moottorin virtaväreeseen ja momenttidynamiikkaan eli virtavasteeseen. Asiasta tekee vaikean se, että virtaväre ja $-vaste$ käyttäytyvät päinvastaisesti. Toisin sanoen moottorin alkutilan induktanssin ollessa pieni saadaan hyvä virtavaste, mutta paljon virtavärettä ja päinvastoin. Myös moottorin kehittämä magnetomotorinen voima, mmv , vaikuttaa virtaväreeseen suuruuteen. Magnetomotorinen voima riippuu moottorin pyörimisnopeudesta, joten virtaväre muuttuu myös taajuuden funktiona. (Kaukonen, 2003).

4.4 Mitoitusprosessi / mitoituksen kulku

Sähkökoneen mitoitus tarjousta varten alkaa, kun asiakkaalta on tullut kysely myyjälle. Joissain tapauksissa on olemassa jo valmiiksi niin sanottu listakone, joka täyttää asiakkaan vaatimukset. Tällöin ei tarvitse ryhtyä mitoittamaan konetta. Nopeussäädetyt tahtimoottorit joudutaan kuitenkin mitoittamaan lähes jokainen erikseen, koska niiden erikoisvaatimukset, kuten esimerkiksi ylikuormavaatimukset ovat lähes aina sovelluskohtaisia. Jotta pystytään täyttämään sekä tekniset että taloudelliset vaatimukset, on tunnettava seuraavat mitoituksen tarvittavat lähtötiedot:

- nimellisteho P_N
- nimellisjännite U_N
- nimellisnopeus n tai nimellistaajuus f_N ja napapariluku p
- sallittu lämpenemä
- jäähdytystapa
- standardit
- luokitukset
- käytötapa
- kotelointiluokka
- roottorin magnetointitapa (harjallinen / harjaton)
- muut teknilliset vaatimukset kuten ylikuormavaatimukset, maksimi momentti, maksimiteho, suurin sallittu pyörimisnopeus, jne.

Sähkökoneen mitoittaminen on erittäin monimutkainen prosessi, jossa on noin 30-40 vapaata muuttujaa. Nämä muuttujat yhdessä annettujen lähtötietojen kanssa määräävät koneen mitat ja ominaisuudet. (Jokinen, 1982). Käytännössä mitoituksen lähtökohtana on jokin jo valmistettu kone, jolloin moni muuttuja saa vakioarvon. Yksinkertaisimmillaan mitoittettavan koneen poikkileikkaus pysyy vakiona. Näin vapaiksi muuttujiksi jää vain staattorin levypaketin pituus sekä käämitys. (Shibutani, 1998).

Peruskone

Peruskoneella tarkoitetaan konetta, joka toimii mitoituksen lähtökohtana. Yleensä peruskone on jokin aikaisemmin valmistettu kone, jolloin voidaan käyttää jo olemassa olevia työkaluja. Lisäksi raja-arvoja määritettäessä voidaan käyttää koestustuloksia apuna.

Kun oikea peruskone on valittu, asiakkaan vaatimukset täyttävä kone voidaan mitoittaa vain pituutta ja käämistystä muuttamalla. Pituus ja käämistys valitaan siten, että kone on sekä termisesti että magneettisesti peruskoneelle asetettujen rajojen sisäpuolella. Termiset rajat määräytyvät käyttöympäristön, jäähdytyksen, eristeluokan ja standardien määrittelemän lämpöluokan mukaan. Magneettiset rajat saadaan itse peruskoneelta. Tämän takia peruskoneen vuontiheydet on mitoitettu maksimiarvoonsa.

Raja-arvot

Raja-arvot ovat oleellinen osa peruskonetta. Niiden mukaan määritellään tietystä peruskoneesta saatava maksimivääntömomentti. Peruskoneajatus perustuu siihen, että koneen maksimi virran- ja vuontiheydet tunnetaan. Raja-arvot riippuvat moottorityypistä, sovelluksesta, ympäristöolosuhteista, standardeista sekä asiakkaan erikoisvaatimuksista jne.

Raja-arvot muuttuvat kokemuksen ja koestustulosten mukaan. Asetettuja raja-arvoja korjataan, mikäli koestustulokset osoittavat sen tarpeelliseksi. Käytännössä raja-arvoja määritettäessä vertaillaan aina koestettuja tuloksia laskettuihin. Kokemuksen mukaan hyvin suunniteltujen tahtikoneiden virran- ja vuontiheydet pysyvät tietyissä rajoissa. ABB Oy, Sähkökoneiden valmistamien avonapaisten tahtikoneiden raja-arvot pysyvät suunnilleen taulukossa 4.5 esitettyjen rajojen sisäpuolella. Näitä raja-arvoja voidaan pitää suuntaa antavina. Taulukossa on sekä suoraan verkkoon käynnistettävien että nopeussäädettyjen moottoreiden raja-arvoja. Verkkokäynnisteiset moottorit mitoitetaan yleensä magneettisesti löysemmin kuin nopeussäädetyt moottorit, koska käynnistyksen aikaista lähtövirtaa rajoitetaan. Lisäksi suoraan verkkoon käynnistettävät moottorit toimivat aina 50 tai 60 Hz taajuudella, jolloin rautahäviöt ovat suuremmat.

TAULUKKO 4.5 Tahtimoottorin rasisutsten raja-arvoja

Suure	Verkkokäynnisteinen moottori	Nopeussäädetty moottori (cos φ = 1)
Magneettivuon tiheys [T]		
Ilmaväli (B1)	0,6...0,9	0,8...1,1
Staattorin hammas (BZ11)	1,5...1,9	1,7...2,1
Staattorin selkä (B1A)	0,9...1,5	1,3...1,8
Napavarsi (Bm)	0,9...1,5	1,3...1,8
Virran tiheys [A/mm ²]		
Staattorin urakäämitys	3...6	3...6
Roottorin avonapakäämitys	3...4	3...4

Taulukossa nopeussäädettyjen moottoreiden raja-arvot ovat syklokonvertterikäyttöjen aikakaudelta. Syklokonvertterista saatava moottorin syöttöjännitteen lähtötaajuus on maksimissaan 24 Hz (40 %, 60 Hz verkossa) eli kyseessä ovat matalataajuiset nopeussäädetyt tahtimoottorit. Taajuuden ollessa pieni voidaan moottori mitoittaa magneettisesti tiukaksi, koska rautahäviöt eivät kasva alle 25 Hz taajuuksilla kovinkaan suuriksi. Nykyään ACS 6000SD taajuusmuuttajalla on mahdollista saada jopa 75 Hz:n syöttöjännite. Taajuuden kasvaessa rautahäviöt kasvavat, jolloin vuontiheysrajoja joudutaan pienentämään suurilla taajuuksilla. Karkeasti voidaan sanoa, että pienillä taajuuksilla voidaan sallia suuremmat vuontiheydet kuin suurilla taajuuksilla. ACS 6000SD -taajuusmuuttajan lisähäviöt huomioon ottaen myös virrantiheysrajoja on pienennettävä suurilla taajuuksilla. Suurtaajuustahtimoottoreiden mitoittamisen tekee

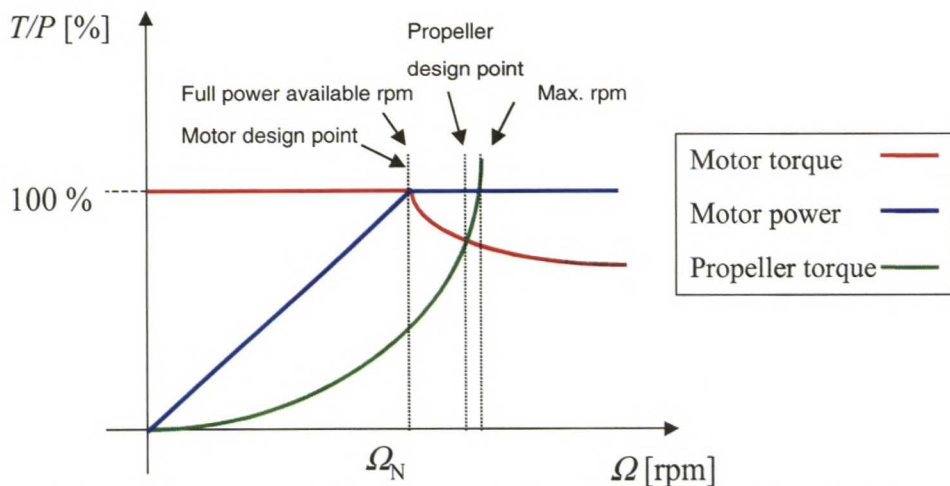
haastavaksi vähäinen referenssikoneiden määrä. Tämän takia niiden mitoitus on tarkkojen FEM –simulointitulosten varassa.

4.4.1 Eri sovellusten mitoituksesta

Luvussa 4 on käyty yleisesti läpi koko nopeussäädetyin tahtimoottorin mitoitus. Koska mitoittaminen on erittäin monimutkainen prosessi, käydään lyhyesti läpi muutaman tyypillisen nopeussäädetyin tahtimoottorisovelluksen mitoittaminen. Esimerkkisovelluksia on kaksi: Azipod –ruoripotkurimoottori sekä eräs metalliteollisuuden sovellus ylikuormavaatimuksineen. Kummatkin esimerkit ovat ACS 6000SD –taajuusmuuttajalla ohjattuja nopeussäädettyjä tahtimoottorikäyttöjä.

Azipod –ruoripotkurimoottori (DTC)

Azipod -ruoripotkurimoottori mitoitetaan asiakkaan haluamalle potkurin vääntömomentille eli potkuripisteessä halutaan tietty teho tietyllä pyörimisnopeudella. Kuvassa 4.8 on moottorin teho- ja momenttikäyrät pyörimisnopeuden funktiona. Lisäksi kuvassa on potkurin vastamomenttikäyrä, jonka mukaan moottori mitoitetaan. Ruoripotkurimoottorin mitoituksen lähtökohtana on potkuripiste, joka on yleensä kentänheikennysalueella. Moottorin suunnittelupiste on kentänheikennyspiste ja ACS 6000SD käytöissä kentänheikennyspiste on myös moottorin nimellispiste. Kentänheikennyspisteen pyörimisnopeus on normaalisti 10 prosenttia potkuripisteen pyörimisnopeutta pienempi. Syklokonvertterikäytöissä kentänheikennyspiste mitoitetaan moottorin nimellispisteen alapuolelle. Näin kompensoidaan syklokonvertterin aiheuttamaa loistehoa.



KUVA 4.8 Potkurimoottorin mitoitukseen käytetään yleensä seuraavia toimintapistettä: kentänheikennyspiste (motor desing point), nimellispiste (full power available) ja maksimipyörimisnopeus (max. rpm). Nämä pisteet määritetään potkurin vastamomenttikäyrän avulla, potkuripisteestä (propeller desing point).

Ruoripotkurimoottorin erikoisvaatimuksena voi olla suuri momentin tarve alhaisilla pyörimisnopeuksilla esimerkiksi jäänmurtajien liikkeelle lähdössä. Tällöin voidaan käyttää virranvahvistusta. Virranvahvistus ei vaikuta oleellisesti moottorin mitoitukseen, mikäli ylimomentin tarve on lyhytaikaista. Jos halutaan, että moottori toimii jäänmurtajamoodilla jatkuvasti, joudutaan jäähdyttimen jäähdytysaineen lämpötilaa laskemaan.

TAULUKKO 4.6 *Esimerkki Azipod –ruoripotkurimoottorin lähtötiedoista*

Yleiset lähtötiedot:		Sähköiset lähtötiedot:	
Standardi	IEC 60034	Jäädettävän ilman lämp.	45 °C
IC-luokka	IC 8A6W7	Teho	18 000 kW
Lämpöluokka	F	Potkurin pyörimisnopeus	170 rpm
IP-koodi	IP 44	Kentänheikennysnop.	155 rpm
Käyttötapa	S1	Nimellismopeus	155 rpm
Magnetointitapa	Harjaton	Maksimimopeus	175 rpm
Jäähdytysaineen lämp.	36 °C	Jännite (ACS 6000SD)	3100 V

Metalliteollisuusmoottori (DTC)

Metalliteollisuuden moottorit mitoitetaan yleensä sovelluksen vaatimalle keskimääräiselle teholle. Mitoituspisteenä on kentänheikennyspiste, jossa vuon- ja virrantiheydet ovat maksimissaan. Moottorin nimellispiste on yleensä sama kuin kentänheikennyspiste. Lisäksi sovelluksilta vaaditaan yleensä pitkää kentänheikennysaluetta, mikä mahdollistaa suuren maksimipyörimisnopeuden moottorille. Maksimipyörimisnopeus voi olla joskus jopa kolminkertainen nimellismopeuteen verrattuna. Myös ylikuormavaatimukset vaikuttavat oleellisesti metalliteollisuuden, esimerkiksi valssikäytön mitoittamiseen.

TAULUKKO 4.7 *Esimerkki metalliteollisuusmoottorin lähtötiedoista*

Yleiset lähtötiedot:		Sähköiset lähtötiedot:	
Standardi	IEC 60034	Jäädettävän ilman lämp.	45 °C
IC-luokka	IC 8A6W7	Teho	7000 kW
Lämpöluokka	B	Nimellismopeus	450 rpm
IP-koodi	IP 44	Kentänheikennysnop.	450 rpm
Käyttötapa	S1	Maksimimopeus	1000 rpm
Magnetointitapa	Harjaton	Jännite (ACS 6000SD)	3150 V
Jäähdytysaineen lämp.	30 °C	Maksimi ylikuormateho	14 000 kW
Ylikuormavaatimukset (lämpöluokassa F):			
Ylikuorma [% PN]	Tyyppi	Ylikuorman kesto (kuorma / tyhjäkäynti)	
115 %	Jatkuva	-	-
150 %	Toistuva	240 s	180 s
200 %	Satunnainen	15 s	-

Taulukossa 4.7 esitetyt lähtötiedot ja vaatimukset täyttävä moottori tulee mitoittaa siten, että nimellispiste toimii lämpöluokan B rajojen sisäpuolella. Ylikuormitustilanteessa moottorin lämpenemän täytyy pysyä lämpöluokassa F. Ylikuormatilanteista täytyy selvittää, mikä on moottorin kannalta pahin tilanne. Itse mitoitus toteutetaan pahimman kuormitustilanteen mukaan.

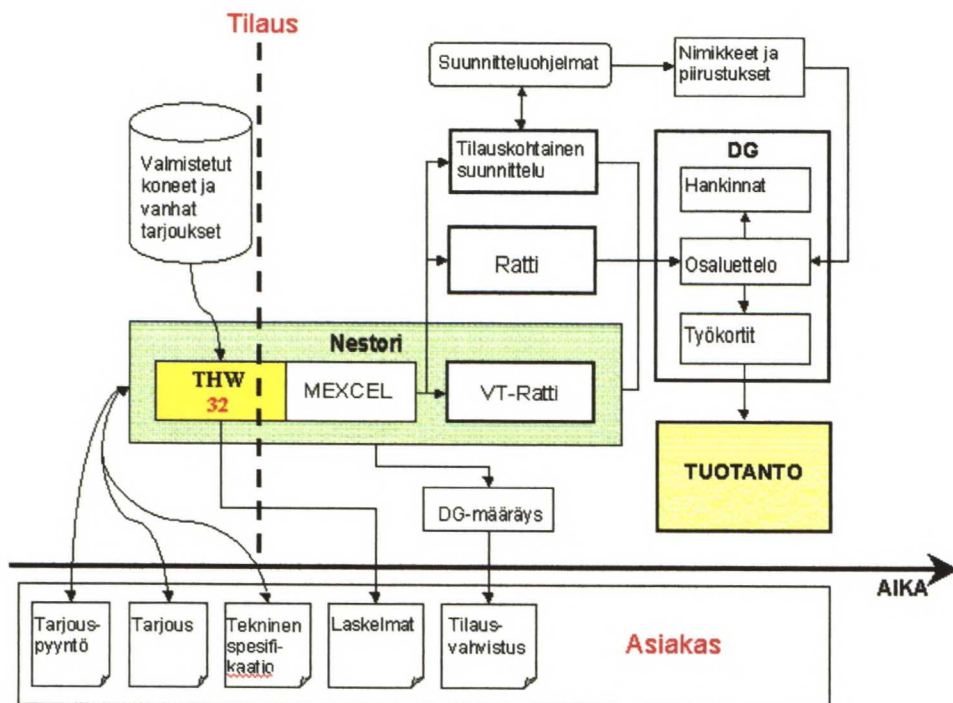
Käytännössä metalliteollisuusmoottorin mitoitus tapahtuu siten, että etsitään moottorityyppi, josta on mahdollista saada haluttu teho ja pyörimisnopeus. Tämän jälkeen tarkastellaan pituutta ja käämitystä muuttamalla, pysyykö koneen virran- ja vuontiheydet asetettujen raja-arvojen sisäpuolella. Mikäli raja-arvot ylittyvät, on kokeiltava isompaa konetta.

5 Sähkösuunnitteluohjelmat

5.1 Yleistä

Nykyään sähkösuunnittelijalla on käytettävissä paperin ja kynän lisäksi monia eri laskentaohjelmia. Ohjelmien laskentamallit voidaan jakaa kahteen eri osaan: analyyttisiin sekä numeerisiin malleihin. Analyyttisten laskentaohjelmien etuna on niiden nopeus. Analyyttisten mitoitusohjelmien laskentatarkkuutta on myös helppo korjata päivittämällä korjauskertoimia mittaustulosten perusteella. Numeerisiin malleihin perustuvat mitoitusohjelmat ovat puolestaan suhteellisen hitaita, mutta hyvin tarkkoja tuloksia antavia ohjelmia. Numeerisilla menetelmillä voidaan esimerkiksi laskea sähkökoneiden sisäinen häviöjakauma suhteellisen tarkasti. Tulosten avulla voidaan kyseisiä häviöitä pienentää (Luomi, 1994).

ABB Oy, Sähkökoneiden Tahtikoneet –yksikössä tilaus-toimitusprosessin tuotetieto kulkee pääpiirteissään kaavion 5.1 mukaisesti. Tilaus-toimitusprosessi alkaa varsinaisesti asiakkaan tilauksesta. Yleensä tilausta edeltää kuitenkin tarjousvaihe. Tarjousvaihe alkaa, kun asiakkaalta tulee tarjouspyyntö haluamastaan sähkökoneesta. Tarjouspyyntöihin vastaavat myyjät teknisen tuen avustuksella. Alustavat tarjoukset ja tekniset spesifikaatiot tehdään myynnin tukiohjelmalla, Nestorilla. Nestorin sähkötekkinen tietämys on valmistettujen koneiden tietokannassa sekä analyyttisessä mitoitusohjelmassa, THW 32 :ssa.



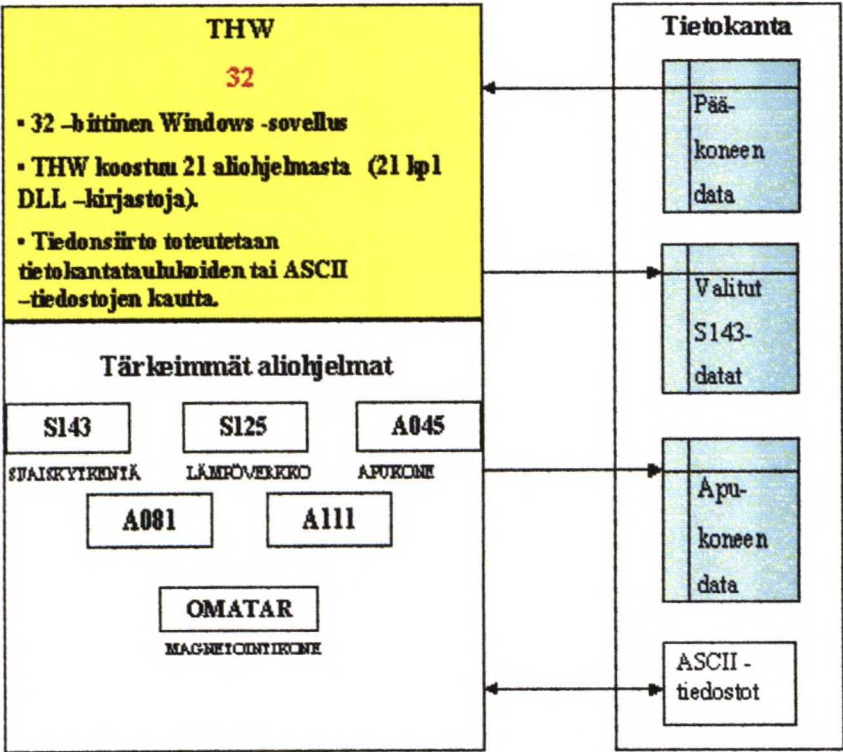
KUVA 5.1 Tilaustoimitusprosessin tuotetietokaavio. (LÄHDE: Jaakkola J., Tahtikoneiden tuotekehitysosaston esittely, ABB Oy:n sisäinen esittely.)

THW :sta saadaan koneen sähkötekniisten arvojen lisäksi myös sen geometriset mitat. Teknisen spesifikaation syntymisen jälkeen alkaa koneen rakennesuunnittelu. Rakennesuunnittelu koostuu karkeasti kolmesta eri ohjelmasta, jotka ovat VT-Ratti, Ratti ja DG. Näiden ohjelmien avulla mitoitetaan koneen sähköiset vaatimukset täyttävä rakenne. Lisäksi koneen rakennesuunnittelu saattaa sisältää tilauskohtaista suunnittelua. Lopputuloksena saadaan osaluettelo ja työkortit osien hankintaa ja tuotantoa varten.

5.2 Analyttinen mitoitushjelma - THW

Sähkösuunnittelijan työkalun, analyttisen mitoitushjelman historia yltää 1960 –luvun puoliväliin saakka. TH –niminen ohjelma koostui tuolloin noin kymmenestä eri aliohjelmasta. Kaikkien aliohjelmien nimet koostuivat yhdestä kirjaimesta ja kolmesta numerosta. Tahtikoneen sijaiskytkentään perustuva mitoitusaliohjelma, S143, on edelleen analyttisen mitoitushjelman ydin. Se laskee tahtikoneen sijaiskytkennän parametrit koneen rakenteen perusteella. (Shibutani, 1998).

Nykyään aliohjelmiä on olemassa noin 20 kappaletta ja ne ovat käännetty Fortran –kääntäjällä DLL-tiedostoiksi (Dynamic Link Library). Ohjelmat toimivat yhdessä siten, että THW 32:ssa määritellään sähkökoneen sähköiset ja geometriset parametrit ja kone lasketaan läpi aliohjelmilla, DLL –tiedostoissa. Tuloksena saadaan muun muassa koneen sijaiskytkennän parametrit, häviöt ja lämpenemä tulostiedostoihin.



KUVA 5.2 Yksinkertaistettu kaavio analyttisen mitoitushjelman, THW:n toiminnasta.

5.3 Numeeriset laskentaohjelmat

Sähkösuunnittelijan mitoituksen apuna on yleensä erilaisia numeerisia malleja. Esimerkiksi mitoitettaessa tahtimoottoria taajuusmuuttajakäyttöön, moottorissa syntyvien lisähäviöiden määrittäminen on numeerisen mallin avulla mahdollista. ABB Oy, Sähkökoneilla on käytössä Teknillisen korkeakoulun Sähkömekaniikan laboratoriossa kehitetty FCSMEK, FEM –laskentaohjelma.

FCSMEK on Teknillisen korkeakoulun Sähkömekaniikan laboratoriossa kehitetty elementtimenetelmään perustuva sähkökoneiden simulointiohjelma. Ohjelman ratkaisu perustuu FE (Finite Element) –menetelmään, jossa kaksiulotteinen poikkileikkaus koneen pienimmästä mahdollisesta symmetriasta jaetaan pieniin osa-alueisiin eli elementteihin. Yhdessä elementit muodostavat tutkittavaan alueeseen verkon. Ohjelma mallintaa koneen magneettikentän kaksiulotteisena. Vyyhdenpäiden impedanssit syötetään vakioarvoina ja otetaan huomioon piiriyhtälöissä.(Arkio, 2000).

Muita käytössä olevia numeerisia laskentaohjelmia ovat muun muassa Flux-2D sekä ACE. Flux-2D on ABB:n virallinen kaksiulotteinen kenttälaskentaohjelma. Uutena numeerisen laskennan työkaluna on Teknillisessä korkeakoulussa kehitetty Simulink:n ja FCSMEK:n kenttälaskennan yhdistämistä, missä sähkökoneen parametrit saadaan Simulink –mallista. Myös taajuusmuuttajan malli on mahdollista mallintaa Simulink:lla. Taajuusmuuttaja mallista saadaan puolestaan FEM –laskennan jännitemalli, mikä tulee olemaan suuri apu suunniteltaessa esimerkiksi taajuusmuuttajalla ohjattuja sähkömoottoreita.

6 Tarjouslaskentaohjelmat

Tarjouslaskentaohjelmia eli niin sanottuja myynnin tukiohjelmia käyttävät pääasiassa myyjät. Sähkökoneen mitoittaminen on haastava ja paljon sähkötekniistä tietämystä vaativa tehtävä. Tämän takia sähkösuunnittelijan tietämys on pyritty ohjelmoimaan erilaisiin myynnin tukiohjelmiin.

Tarjouslaskentaohjelmalla tehdään asiakkaan vaatimukset täyttävän koneen sekä siihen liittyvien varusteiden tarjous. Tarjouslaskentaohjelman tulee olla sellainen, että se tarjoaa mahdollisimman optimaalisia koneita. Optimaalisen koneen kriteereitä, jotka vaikuttavat voimakkaasti koneen hintaan ovat muun muassa:

- vääntömomentti
- koneen koko (tehotiheys)
- hyötysuhde
- valmistettavuus

Näihin kriteereihin vaikutetaan sähkökoneen mitoittamisella. Tarjouksen tulee olla laskettavissa nopeasti, joten analyttinen laskentatapa on tähän omiaan. Toinen tapa on käyttää konelistoja, joihin on listattu kaikki koneet, jotka on mahdollista valmistaa. Työskentelytavat poikkeavat usein paljon riippuen myyjästä. Eri sovelluksille on olemassa Nestorin lisäksi myös muita myynnin tukiohjelmia, kuten esimerkiksi laivakäyttöjä varten tehty Bemari. Seuraavassa esitellään nykyisin käytössä olevat ohjelmat erilaisten nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden tarjouksen tekoa varten. Nämä ohjelmat ovat varsinaisen kehitystyön lähtökohtana.

6.1 Tarjouslaskentaohjelma - Nestori

Nestorin kehitys alkoi 1990 –luvun puolivälissä, jolloin Jouni Jaakkola suunnitteli diplomityönään Nestorin version 1.0 ja toteutti siitä ensimmäisen testiversion. Nimi, Nestori kuvaa henkilöä, joka omaa erinomaisen kokemuksen ja tiedon tietystä asiasta. Myynnin tukiohjelma, Nestori, omaa erinomaisen tietämyksen valmistetuista ja tarjotuista tahtikoneista, niiden mitoittamisesta sekä hinta- ja valmistustiedoista.

Nestori on alunperin tehty avonapaisten tahtigeneraattoreiden automaattista mitoitusta ja hinnoittelua varten. Avonapaisten tahtimoottoreiden mitoituksen on toteuttanut John Shibutani diplomityönään vuonna 1998. Tahtimoottoreiden mitoitus jakautuu Nestorissa kahteen eri osioon, suoraan verkkoon kytkettävät moottorit (DOL-Direct On Line) ja nopeussäädetyt moottorit (VSD-Variable Speed Drive). Nopeussäädetyille metalliteollisuuden sovelluksille on olemassa peruskoneet, joista Nestori laskee automaattisesti parhaiten asiakkaan vaatimukset täyttävän koneen. Nopeussäädettyjen moottoreiden mitoitus Nestorissa toimii matalataajuisille metalliteollisuuden käytöille suhteellisen hyvin. Ongelmana on suuren taajuuden koneet, koska suurin osa peruskoneryhmän koneista on syklokonvertterikäyttöihin mitoitetuja, eli taajuusalueelle 4 – 24 Hz.

6.1.1 Sovelluksen kehitysympäristö – Delphi 5

Nestori on 32 –bittinen Windows –sovellus, joka on tehty Borlandin Delphi 5 sovelluskehitystyökalulla. Delphi valittiin Nestorin kehitysympäristöksi sen nopeuden ja monipuolisuuden takia (Jaakkola, 1995). Delphissä on integroitu nopea konekielikääntäjä, visuaalinen, olio-ohjelmointia tukeva kehitysympäristö sekä skaalattava tietokantateknologia. Tämä mahdollistaa nopean ja tehokkaan sovellusten kehittämisen. Delphissä on laaja komponenttikirjasto, jota tarvitaan täysipainoisen 32 –bittisen Windows –sovelluksen kehittämiseen. Sillä on mahdollista toteuttaa myös omia Internet-sovelluksia, mikä on erittäin tärkeää kehitettäessä Webbi-Nestoria. Tällöin säästetään huomattavasti ohjelmointiajassa, kun voidaan käyttää jo valmiiksi ohjelmoituja funktioita ja proseduureja.

6.1.2 Nestorin käyttöliittymä

Nestorissa on noin 130 Pascal-koodia sisältävää tiedostoa (Unit). Niistä yli 90:llä on oma graafinen käyttöliittymänsä, käyttäjälle näkyvä ikkuna (Form). Nykyään Nestori koostuu yli 90 000 koodirivistä, minkä lisäksi se käyttää Fortranilla tai Delphillä käännettyjä DLL –kirjastoja. DLL –kirjastoja ohjelma kutsuu tarvittaessa. Tiedon siirto Nestorin ja kirjastojen välillä tapahtuu tietokannan tietotaulujen (Table) välityksellä.

Liitteessä 3 on kuvat Nestorin perusnäkökymistä. Näkymässä Nestori on tarjoustilassa, jonka tunnistaa siitä, että vasemmassa yläkulmassa oleva logo kuvaa käden puristusta. Kun kyseessä on vahvistettu tilaus, logo vaihtuu muistiota ja rahaa kuvaavaksi. Tässä yhteydessä tutustumme lähemmin vain Nestorin tarjoustilan toimintoihin. Tarjoustila koostuu kahdesta eri päänäkökymistä:

1. Projektidata, missä käsitellään projektin yleisiä tietoja, kuten projektin nimi, tarjouksen voimassaoloaika, asiakkaan yhteystiedot.
2. Positiodata, missä on tarjottavan tuotteen / tuotteiden tietoja. Positioikkuna jakautuu puolestaan kuudelle eri sivulle, joissa on tietoja koneen mitoituskriteereistä (Primary data), sähköisistä mitoitusarvoista (Electrical data), konfiguraatiosta (Configuration), varusteista (Accessories), aikataulusta (Time schedule) sekä hinnoittelusta (Pricing).

Pääikkunan lisäksi Nestorissa on suuri joukko erillisiä ikkunoita, joista suurin osa on erilaisten parametrien ja tietojen syöttämistä varten. Sähkökoneen mitoittamisen kannalta tärkeimpiä ovat kaikille konetyypeille yhteinen yleisten mitoituskriteerien syöttöikkuna ja kullekin konetyypille oma mitoitusparametrien syöttöikkuna. Liitteessä 4 on kuva Primary data –ikkunasta ja esimerkkinä nopeussäädetyin moottorin parametri-ikkuna.

6.1.3 Nestorin tietokantarakenne

Nestorin tietämys on tallennettu tietokantaan. Tietokannassa data tallennetaan tietotaulujen kenttiin. Taulukoiden määrä on kasvanut huomasti Nestorin kehittyessä ja tallennetun tiedon lisääntyessä. Nestorissa on kahden tyyppisiä tauluja: tauluja tiedon tallentamiseen ja tauluja, joihin tallennetaan tietoa vain väliaikaisesti. Taulut voidaan jakaa myös niiden datasisällön perusteella seuraavasti:

1. Tarjouspositiotaulut sisältävät tiedon tarjouksien perustiedoista.
2. Peruskonetaulut sisältävät tiedon kaikista Nestorilla laskettavista koneista. Tauluissa on tarvittavat lähtötiedot (koneiden läpileikkaukset) Nestorin laskennalle.
3. Tulostaulut sisältävät tiedon SQL –haun tuloksista sekä valitut tulokset DLL –kirjastojen laskentatuloksista.
4. Muita tauluja, joihin kuuluvat esimerkiksi asiakastaulu, hintalistataulu jne.

6.1.4 Nestorin tulosteet

Nestorin asiakastulosteita ovat:

1. Tekninen spesifikaatio, joka sisältää mitoitettun koneen mitoituskriteerit ja tekniset tiedot sekä tekniset kuvaukset kaikista varusteista.
2. Tarjous, jossa on asiakkaalle menevät hintatiedot eriteltynä koneelle, varusteille sekä mahdollisille lisävarusteille.

Tulosteet ovat Microsoft Word –dokumentteja, jotka Nestori täyttää automaattisesti. Sekä tekniselle spesifikaatiolle että tarjoukselle on olemassa omat Word –templaattit eli pohjat. Templaattit täytetään ohjelmallisesti Word:n peruskomentoja käyttäen.

6.2 Tarjouslaskentaohjelma - Bemari

Bemari on Exceliin syötettyihin konelistoihin perustuva mitoitusohjelma. Sen mitoistarkkuus on riittävä budjettitarjouksia varten. Bemari on alunperin tehty tahti- ja epätahti-Azipodien mitoitusta varten. Myöhemmin siihen on lisätty myös muita laivasovelluksiin sopivien koneiden mitoitukset, kuten tavallisten potkurimoottoreiden sekä laivojen dieselgeneraattoreiden mitoitus. Koneen valinta listalta tapahtuu Excel –makroiin ohjelmoidun logiikan perusteella.

Bemaria käyttävät Marine -liiketoimintayksikön myyjät. Marinen myynti on systeemimyyntiä, eli Marine toimii ABB:n komponenttivalmistajien asiakkaana, joka kokoaa ja myy kokonaisia laivojen sähkö- ja potkurijärjestelmiä.

6.2.1 Bemarkin käyttöliittymä

Bemari on tehty myyjän apuvälineeksi, Ohjelman käyttäjällä ei välttämättä tarvitse olla kovinkaan hyvää ymmärrystä ja kokemusta sähkökoneista. Se ohjaa myyjää vahvasti standardiratkaisujen suuntaan toisin sanoen niihin konetyyppeihin ja kokoihin, mitä Excelin konelistaan on laitettu. Käyttäjältä vaaditaan kuitenkin jonkinlaista tietämystä potkurin toimintapisteistä. Kokonaisuudessaan Bemarkin käyttöliittymästä on tehty yksinkertainen, käyttäjäystävällinen ja helppo.

Käyttöliittymä on tehty Microsoft Excelillä. Muut toiminnot ja mitoituksen logiikka on ohjelmoitu Microsoft Visual Basic –ohjelmointikielellä. Käyttöliittymä koostuu

erillisistä Excel –sivuista, joita on yhteensä 15 kappaletta. Liitteen 5 kuvat antavat käsityksen potkurimoottoreiden mitoituksen käyttöliittymästä Bemarissa.

6.2.2 Bemarin tulosteet ja liitynnät

Bemarin tulosteena saadaan koneen tekninen informaatio sekä hintatiedot. Tulosteet saadaan välittömästi kyseisen koneen valintasivulle. Etuna on ohjelman nopeus. Tulos saadaan välittömästi koneen valintanappulan painalluksen jälkeen. Tulosteet ovat A4 – kokoisia Excel –sivuja, mitkä on myös mahdollista tallentaa omaksi Excel –tiedostoksi.

Koska ABB Oy, Marinen tarjoukset ovat yleensä budjettitarjouksia kokonaisen laivan sähköjärjestelmästä, potkurimoottorin ja sähköä tuottavan generaattorin tarjoukset ovat vain yksi osa sitä. Tämän takia Bemarista on liittynä tarjoustyökaluun, joka tekee tarjouksen koko laivan sähköjärjestelmästä. Se tuo omat haasteensa myös Nestorin kehittämiselle.

7 Nopeussäädettyjen moottoreiden tarjouslaskennan kehityssuunnitelma

7.1 Yleistä

Tämä kehityssuunnitelma kertoo, millainen on tehokas ja käyttäjäystävällinen VSD (Variable Speed Drive) moottorin mitoituslaskenta Nestorissa. Työ aloitettiin kesäkuussa 2002, jolloin koottiin työryhmä kartoittamaan VSD -laskennalta vaadittavia ominaisuuksia. Työryhmän tehtävänä oli saada määriteltyä käyttäjän tarpeet täyttävä käyttöliittymä ja sen taustalle tarvittavat laskentarutiinit. Edellä mainitun palaverin antia on käytetty tämän suunnitelman lähtökohtana. Suunnitelmaa on täydennetty kehitysprojektin avainhenkilöiden sekä Nestorin käyttäjien haastatteluilla.

Tavoitteena on parantaa Nestorin nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoituslaskentaa ja sen graafista käyttöliittymää siten, että se palvelee kehittyneitä käyttäjiä sekä peruskäyttäjiä. Erityisesti laivasovelluksissa on tavoitteena ylläpitää Bemarin tasoinen käyttäjäystävällisyys potkurimoottori- sekä Azipod -sovelluksille. Käyttöliittymän tulee soveltua metalliteollisuuden- ja laivasovelluksien nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoittamiseen.

Kehityksen pääpaino on ACS 6000SD -taajuusmuuttajalla ohjattujen moottoreiden laskennan parantamisessa, mutta ohjelman tulee tukea myös syklokonvertterilla ohjattujen tahtimoottoreiden mitoituslaskentaa. Kuormakommutoidulla suuntaajalla (LCI) ohjattujen tahtimoottoreiden osuus myynnistä on sen verran pieni, että tässä työssä ei puututa niiden mitoittamiseen.

Kehityssuunnitelma käsittelee pääpiirteissään seuraavia asioita:

- käyttöliittymältä vaadittavat ominaisuudet
- perustoiminnot ja mitoituslähtökohdat
- Bemarin toimintojen yhdistäminen Nestoriin
- mitoituslaskennan kartoittaminen / kerääminen

7.2 Käyttäjien asettamat tarpeet

Nestorin käyttäjät voidaan karkeasti jakaa kahteen eri ryhmään heidän sähkökonetietämyksensä mukaan:

1. Peruskäyttäjät, joilla ei ole kattavaa tietämystä sähkökoneen mitoittamisesta. Peruskäyttäjäksi voidaan luokitella myyjät, joilla ei ole sähkötekniikasta taustaa. Useinmiten tällainen myyjä työskentelee systeemimyyjänä, jolloin myyjällä on paljon laajempi käsitys koko systeemistä, missä sähkömoottori on vain osa sitä.
2. Kehittyneet käyttäjät (Advanced user), kehittyneenä käyttäjän voidaan pitää sähkösuunnittelijaa tai myyjää, joilla on kokemusta sähkökoneiden mitoittamisesta.

Nestorin tulee palvella näitä kumpaakin käyttäjäryhmää. Peruskäyttäjien on pystyttävä tekemään 'tyypillisten' koneiden tarjoukset vaivattomasti ja nopeasti. Haastavammat tapaukset hoitaa usein kehittyneempi käyttäjä. Kyseisessä tapauksessa tarvitaan usein enemmän lähtöparametrejä. Tällaisia parametrejä saattavat olla esimerkiksi erikoiseen käämitysvaihtoehtoon liittyvät parametrit tai erikoiset ylikuormavaatimukset.

7.2.1 Myynnin tarpeet

Nestorilla suunniteltavan koneen alustavan mitoituksen ja tarjouksien teon täytyy olla helppoa ja nopeaa. Myyjän täytyy pystyä tekemään 'tyypillisten' koneiden tarjoukset ilman, että hänellä on laajaa teknistä kokemusta tahtikoneista. Näin pystytään kasvattamaan potentiaalisten myyjien määrää.

Tahtikoneita myydään kahdella eri tavalla:

1. Tuotemyyntinä, jossa koneita myydään yksittäisinä tuotteina myyntiyhtiöiden kautta.
2. Systeemimyyntinä, jossa ABB:n tulosityksiköt myyvät kokonaisjärjestelmiä. Tahtikoneet ovat tässä vain osa kokonaiskauppaa. Tällöin ABB:n asiakkaana on ABB itse. Tästä esimerkkinä ovat jo mainittu Marine sekä metalliteollisuuden järjestelmiä myyvä IDS – Integrated Drive Systems.

Suurin osa nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden myynnistä tehdään systeemimyyntinä ABB:n systeemi-integraattoreiden välityksellä. Tämän takia on tärkeää saada ohjelmasta sellainen, että mahdollisesti myös niiden yhtiöiden myyjät voisivat käyttää Nestoria.

7.2.2 Suunnittelun tarpeet

Tällä hetkellä Nestorissa näytetään paljon ylimääräistä tietoa myyjän työkaluksi. Esimerkiksi laskennan etenemistä voidaan seurata Calculation progress -ikkunasta, missä näytetään kyseisen koneen sähköisiä arvoja, geometrisiä mittoja, häviöt sekä virran- ja vuontiheysarvoja. Ikkuna on erittäin hyödyllinen ohjelman testauksessa sekä uusien raja-arvojen ja parametrejä asetettaessa. Sen avulla suunnittelija voi nopeasti tarkistaa mitoituksen tuloksen ja siten varmistua, että muutokset menivät oikein. Tästä johtuen Nestorista on tehtävä kaksitasoinen, missä voi helposti valita esimerkiksi sen näkykö tulokset laskennan aikana vai ei.

Sähkösuunnittelijalle Nestorin täytyy olla sellainen, että suunnittelijan on helppo lisätä omaa tietämystään esimerkiksi erilaisiin parametreihin Nestoriin. Tällaisia ovat muun muassa peruskoneelle syötettävät arvot. Nestori on tehtävä siten, että mahdollisimman vähän parametrejä ja muita arvoja on kiinteästi ohjelmoituna koodiin. Tämän takia Nestoriin on tehtävä syöttökenttiä kyseisiin muuttujiin varten. Sähkösuunnittelijalle on tärkeää, että Nestorin peruskoneiden ja muiden parametrien asettaminen on helppoa tai ylipäättään mahdollista.

7.3 Bemarkin toimintojen integrointi Nestoriin

Laivasovellusten: potkurimoottoreiden ja Azipod-ruoripotkurimoottoreiden tarjouslaskennan lähtökohtana on Bemarki –tarjouslaskentaohjelma. Bemarkin toiminnoista on valittava, mitä otetaan mukaan Nestorin laivakäyttöjen laskentaan. Bemarkista Nestoriin integroitavia ominaisuuksia ovat muun muassa:

- helppokäyttöinen käyttöliittymä (mitoitusparametrien syöttöikkunat, liite 5)
- potkuripisteeseen perustuva laskenta
- moottorin ja potkurin teho- ja vääntömomenttikäyrien piirto
- tekninen spesifikaatio

Liityntä koko laivan sähköjärjestelmän tarjouslaskentaohjelmaan, Maritaan, on mahdollista toteuttaa esimerkiksi Microsoft Excel:n kautta.

7.3.1 Mitoitusparametrit

Bemarkin käyttöliittymä on nopea- ja helppokäyttöinen. Mitoitukseen / koneen valintaan tarvittavia parametrejä ovat vain potkuripisteen pyörimisnopeus ja teho. Muut parametrit ohjelma täyttää automaattisesti oletusarvoilla. Myös moottorin muut laskentapisteen kuten kentänheikennys-, nimellis- ja maksimipisteen ohjelma määrittää automaattisesti. Tähän on pyrittävä myös Nestorin toteutuksessa.

Bemarkin laskenta on vain syklokonvertterikäyttöille (ACS 6000c), joten Nestori –laskenta on tehtävä myös ACS 6000SD –käyttöille. Tämä lisää Nestorille ohjelmoitavien oletusarvojen määrää. Myös mitoituksen raja-arvot ovat erilaiset syklokonvertteri- ja ACS 6000SD –käyttöille.

7.3.2 Uudet peruskoneet

Nestorin peruskonekantaan on myös täydennettävä, koska laskenta perustuu vahvasti kannassa oleviin peruskoneisiin. Tavalliset potkurimoottorit voidaan mitoittaa samoista peruskoneista kuin metalliteollisuuden nopeussäädetyt moottorit peruskoneryhmästä Metals1. Azipodeille on tehtävä kokonaan uudet peruskoneet. Koska ACS 6000SD-taajuusmuuttajalla ohjatuilla Azipodeilla ei ole vielä referenssikoneita, tehdään niille kokonaan oma peruskoneryhmänsä. Uudet Azipod -peruskoneet on tehtävä omiin peruskoneryhmiinsä, joita ovat:

- Azipod DTC
- Azipod Cyclo

7.4 Mitoitustietämyksen kerääminen

Sekä metalliteollisuus- että potkurimoottoreiden käytännön mitoitustietämystä kerätään kyseisten koneiden suunnittelijoilta sekä tuotekehityksen asiantuntijoilta. Muita lähteitä ovat muun muassa valmistettujen koneiden koestustulokset, muut mittaustulokset, tehdyt simulointitulokset ja olemassa olevaan sähkökoneiden tietämuskantaan tehdyt dokumentit. Näitä hyväksikäyttäen kootaan uusia ideoita ja sääntöjä toteutettavaa nopeussäädettyjen moottoreiden Nestori –laskentaa varten.

8 Toteutettu nopeussäädettyjen moottoreiden tarjouslaskenta

8.1 Yleistä

Varsinainen toteutustyö tehtiin kahdessa osassa. Ensimmäisessä vaiheessa toteutettiin Azipod- ja potkurimoottoreiden mitoituksen käyttöliittymä ja tarvittavat toiminnot sen taustalle. Tämän lisäksi kehitettiin metalliteollisuusmoottoreiden mitoitusparametrien syöttöikkunaa ja mitoitusta kerätyn tietämyksen perusteella. Ensimmäinen nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoituksen testiversio julkaistiin Nestorin version 4.10 päivityksen yhteydessä. Ohjelmaa esiteltiin palavereissa ja käyttäjiltä kerättiin kommentteja ja ideoita. Toteutuksen toisessa vaiheessa saatu palaute jalostettiin Nestorin parannuksina. Valmis nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoitus Nestorissa päivitettiin 16.6.2003 Nestorin versiossa 4.20

Tässä luvussa esitellään toteutetun nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoituksen kulku Nestorissa. Yksinkertaistetusti automaattinen mitoitus etenee lähtötietojen syöttämisen ja hyväksymisen jälkeen seuraavasti:

1. Peruskonekannasta haetaan SQL –haulla kriteerit täyttäviä koneita jatkokäsittelyä varten.
2. Lasketaan koneelle uutta tehoa ja taajuutta vastaava levypaketin pituus.
3. Määritetään koneelle sopivat käämitysvaihtoehdot.
4. Lasketaan ja asetetaan koneelle sallitut maksimiarvot virrantiheyksille, vuontiheyksille, napakulmalle jne.
5. Lasketaan kone läpi eri käämitysvaihtoehdoilla asetetuissa laskentapisteissä. Tarvittaessa joko pidennetään tai lyhennetään levypaketin pituutta ja lasketaan uudestaan. Lopuksi tarkistetaan rajat ja joko hyväksytään tai hylätään laskettu kone.
6. Hyväksytyt koneet asetetaan taulukkoon, mistä lopuksi valitaan paras kone ohjelmoidun logiikan mukaisesti.

Peruskoneen haku, pituuden ja käämityksen muutos perustuvat samaan logiikkaan, jonka John Shibutani on diplomityössään toteuttanut sekä suoraan verkkoon käynnistettäville että nopeussäädetyille moottoreille. Joitain muutoksia on kuitenkin tehty, jotka vaikuttavat lähinnä peruskoneiden SQL-hakuun. SQL-hausta kerrotaan tarkemmin kappaleessa 8.3. Pituuden ja käämityksen muutos ovat yhteisiä proseduureja Nestorin kaikille konetyypeille. Nämä esitellään lyhyesti kappaleessa 8.4. Metalliteollisuusmoottoreiden mitoituksen kehitystä ja ACS 6000SD –taajuusmuuttajakäyttöjen simulointituloksia esitellään kappaleessa 8.5. Laivojen potkurimoottoreiden laskenta käydään läpi kappaleessa 8.6. Nämä ovat kokonaan uusia mitoitusproseduureja. Azipodeille on tehty myös omat peruskoneryhmät syklo-, ja ACS 6000SD –käyttöille erikseen. Potkurimoottoreilla on puolestaan samat peruskoneet kuin metalliteollisuuden moottoreillakin (Metals1).

8.2 Mitoituksen lähtötiedot

Nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoitus Nestorissa alkaa liitteessä 4 esitetystä Primary data –ikkunasta, jossa valitaan muun muassa mitoittettavan koneen tyyppi, tehon syöttötapa sekä sovellus. Näiden kolmen kohdan valintojen mukaan Nestori avaa kyseiselle koneelle sopivan mitoitusparametrien syöttöikkunan. Kone määrittää nopeussäädetyksi, mikäli konetyyppi on moottori ja tehonsyöttötapa ei ole 50 / 60 Hz:n verkko. Nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoitusparametrien syöttöikkunoita on kolme kappaletta. Oikea mitoitusparametri-ikkuna (Search values) aukeaa valitun sovelluksen mukaan. Nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoitusparametrien syöttöikkunoita ovat:

1. Metalliteollisuuden nopeussäädetyt moottorit
2. Azipod –ruoripotkurimoottorit (sovellus: Azipod propulsion motor)
3. Potkurimoottorit (sovellus: Propulsion motor)

8.2.1 Metalliteollisuusmoottoreiden mitoitusparametrit

Liitteessä kuusi on kuva toteutetusta metalliteollisuuden nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoitusparametrien syöttöikkunasta. Ikkuna näyttää hieman monimutkaiselta, mutta helpoimmassa tapauksessa käyttäjän tarvitsee syöttää vain haluttu akseliteho ja pyörimisnopeudet eri toimintapisteissä. Muut tarvittavat parametrit ohjelma täyttää automaattisesti kyseessä olevan taajuusmuuttajan mukaan. Ylikuormapisteiden ja kehittyneen käyttäjän parametrit ovat vapaaehtoisia ja niitä voi käyttää tarvittaessa. Tosin lähes jokaisessa metalliteollisuuden käytössä on ylikuormavaatimuksia. Ylikuormien vaikutusta Nestorin mitoitukseen käydään tarkemmin läpi kappaleessa 8.5.1.

8.2.2 Azipod –ruoripotkurimoottoreiden mitoitusparametrit

Azipodin -ruoripotkurimoottoreiden mitoitusparametrien syöttöikkuna on huomattavasti yksinkertaisempi. Käyttäjän tarvitsee syöttää vain akseliteho ja potkuripisteen pyörimisnopeus. Muut parametrit ohjelma täyttää automaattisesti. Toki käyttäjä voi vielä muuttaa ohjelman asettamia oletusarvoja ennen laskentaa. Liitteessä seitsemän on kuva Azipod:n parametrien syöttöikkunasta.

8.2.3 Tavallisten potkurimoottoreiden mitoitusparametrit

Perinteisten potkurimoottoreiden mitoituksen lähtötiedot ovat lähes vastaavat kuin Azipod:lla. Niiden mitoitus poikkeaa kuitenkin toisistaan sen verran paljon, että niiden mitoitus toteutettiin erillään toisistaan. Liitteessä kahdeksan on potkurimoottoreille tehty mitoitusparametrien syöttöikkuna.

Sekä Azipodeilla että potkurimoottoreilla on tarvittaessa täytettävä lisäpaneeli, jolla moottorin voi mitoittaa tietylle ylikuormalle alhaisemmalla jäähdytysilman lämpötilalla. Näin potkurisovelluksille voidaan luvata erillinen jäänmurtajamoodi.

8.3 Peruskoneen haku

Laskennan ensimmäisessä vaiheessa valitaan peruskonetaulusta vaihtoehdot, joista asiakkaan vaatimukset on mahdollista toteuttaa. SQL –haulla tietokannasta valitaan peruskoneet, joiden konetyyppi, peruskoneryhmä ja napapariluku ovat oikeat. Myös koneen pituuden on pysyttävä peruskoneen rajojen sisäpuolella halutulla teholla. SQL-haussa valitut peruskoneet siirretään väliaikaiseen konetauluun jatkokäsittelyä varten.

TAULUKKO 8.1 *Esimerkki erään metalliteollisuusmoottorin SQL-haun kriteereistä.*

Selite	SQL-haun kriteeri
napapariluku, p	$1 \leq p \leq 3$
konetyyppi	“Motor”
peruskoneryhmä	“Metals1”
minimipituus	$\frac{P}{P_0} \cdot \frac{f_0}{f} \cdot l_0 > l_{\min} - 2 \cdot l_{\text{mod}}$
maksimipituus	$\frac{P}{P_0} \cdot \frac{f_0}{f} \cdot l_0 < l_{\max} + 2 \cdot l_{\text{mod}}$
maksimipyörimisnopeus	$\frac{f_{\max 0} \cdot 60}{p} \geq n_{\max} \text{ [rpm]}$

Taulukossa 8.1 käytettyjen muuttujien selitykset:

p ,	peruskoneen napapariluku
P_0 ,	peruskoneen teho
P ,	uusi teho
f_0 ,	peruskoneen taajuus
f ,	uusi taajuus
$f_{\max 0}$,	peruskoneelle sallittu maksimitaajuus
l_0 ,	peruskoneen pituus
l_{\min} ,	peruskoneelle sallittu minimipituus
l_{\max} ,	peruskoneelle sallittu maksimipituus
l_{mod} ,	modulin pituus, jolla konetta pidennetään tai lyhennetään
n_{\max}	uuden koneen maksimipyörimisnopeus.

8.3.1 Kaksistaattorijärjestelmän vaikutus peruskoneen hakuun

Edellä esitetty esimerkki on koneelle, jossa on yksi staattorijärjestelmä. Nopeussäädetyissä käytöissä tehdään usein kaksi erillistä staattorijärjestelmää. Tähän on syynä yhdestä taajuusmuuttajasta saatava maksimiteho, joka ACS 6000SD:llä on tällä hetkellä 9 MW. Eli yli 9 MW:n ACS 6000SD -käyttöihin on tehtävä kaksi erillistä staattorijärjestelmää. Laivakäytöissä tehdään kaksi erillistä staattorijärjestelmää, jotta saadaan redundantti eli varmennettu käyttö. Kahden staattorijärjestelmän käämitys voidaan tehdä kolmella eri tavalla:

1. Jaettu käämitys, missä staattorikäämit ovat eri puolilla kehää (YY split in 2).
2. Kahdennettu järjestelmä, jossa kummankin staattorin käämit ovat päällekkäin samoissa urissa. Tämä mahdollistaa puolella teholla ajamisen. (YY mixed slots).
3. Niin sanottu redundantti järjestelmä, jossa kahden staattorin käämitykset ovat päällekkäin, mutta 30° vaihesiirrossa (YY 30° shift).

Erilaiset käämitystavat vaikuttavat myös jatkokäsittelyyn valittavien peruskoneiden valintaan. Eri valintakriteerit johtuen staattorin käämityksestä on esitetty taulukossa 8.2.

TAULUKKO 8.2 Kahden staattorijärjestelmän käämityksen vaikutus SQL -hakuun.

2 –staattorijärjestelmän käämitystapa	SQL –haun kriteerit
YY split in 2	$q \bmod 0,5 = 0$ (vakoluvun on oltava 0,5 jaollinen) ja $p \bmod 2 = 0$ (napapariluvun on oltava parillinen)
YY mixed slots	$q \bmod 1 = 0$ (vakoluvun oltava kokonaisluku)
YY 30° shift	Azipod –laskenta: Valinta tapahtuu peruskoneryhmän mukaan. Azipod Cyclo : YY 30° shift (oletus) Azipod DTC : YY mixed slots (oletus)

Erilaiset 2-staattorijärjestelmät aiheuttavat myös muita ehtoja mitoitukseen. Niistä lisää käämityksen muutoksen yhteydessä seuraavassa kappaleessa.

8.4 Yhteiset mitoitusproseduurit

Kaikille konetyypeille yhteisiä mitoitusproseduureja ovat levypaketin pituuden ja käämityksen muutos. Ne ovat niin sanotusti Nestorin koneen mitoituksen ydin. Tässä työssä näihin proseduureihin ei ole tehty suuria muutoksia, mutta ne esitellään tässä, jotta saadaan kokonaiskäsitys koneen mitoituksen kulusta Nestorissa.

8.4.1 Pituuden muutos

Pituuden muutos tehdään kaikille SQL-haussa jatkokäsittelyyn valituille peruskoneille. Peruskoneille on määritetty sallitut maksimi- ja minimipituudet. Mikäli laskettu pituus pysyy asetettujen rajojen sisäpuolella, kone asetetaan tarkasteltavien koneiden joukkoon.

Staattorin levysydämen uusi pituus lasketaan seuraavasti (John Shibutani, 1999):

$$l = \frac{f_0}{f} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot l_0 \tag{8.1}$$

missä

- l_0 on peruskoneen staattorin levysydämen pituus,
- l on uusi levysydämen pituus,
- f_0 on peruskoneen taajuus,
- f on uusi taajuus,
- P_0 on peruskoneen teho,
- P on uusi teho.

8.4.2 Käämityksen muutos

Koneen pituuden muuttuessa myös sen magneettinen tila muuttuu. Koska koneen poikkileikkaus on lukittu, sen magneettiseen tilaan voidaan vaikuttaa käämitystä muuttamalla. Nestori laskee mahdolliset käämitysvaihtoehdot ja asettaa ne taulukkoon läpilaskentaa varten.

Käämityksen muutos tapahtuu Nestorissa seuraavasti (Shibutani, 1999):

1. Haetaan jänniteluokka peruskoneen jännitteelle ja uudelle jännitteelle. Jos jänniteluokat eivät ole samat, muutetaan staattorijohtimen kuparinleveys siten, että uran leveys pysyy samana.
2. Määritetään kuparijohtimen minimi- ja maksimipaksuus.
3. Lasketaan vakoluvun, q , pienin mahdollinen jakaja, n :

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} \quad (\text{kolmivaihekäämitykselle } m = 3) \quad (8.2)$$

$$q = \frac{z}{n}, \text{ missä } z \text{ ja } n \text{ ovat kokonaislukuja.} \quad (8.3)$$

4. Lasketaan uran korkeus kiilaan.
5. Lasketaan maksimiarvo rinnakkaisten haarojen lukumäärälle:

$$a_{\max} = \frac{2 \cdot p}{n} \quad (8.4)$$

6. Lasketaan arvo tehollisten johtimien lukumäärälle ilman rinnakkaisten haarojen huomioimista:

$$j_{\text{temp}} = \frac{l_0}{l} \cdot \frac{U}{U_0} \cdot \frac{f_0}{f} \cdot j_0 \quad (8.5)$$

7. Lasketaan minimi- ja maksimiarvo johtimien lukumäärälle urassa.
8. Lasketaan, mitkä rinnakkaisten haarojen arvot ovat sallittuja:

$$\frac{2 \cdot p}{n \cdot a}, \text{ missä } a \text{ on } 1 \dots a_{\max} \quad (8.6)$$

Mikäli arvo on kokonaisluku, on kyseinen a_2 sallittu rinnakkaisten haarojen lukumäärä.

9. Lasketaan tehollisten lukumäärä kaikilla rinnakkaisten haarojen lukumäärillä (pyöristetään ylöspäin lähimpään parilliseen kokonaislukuun):

$$j = \frac{a}{a_0} \cdot j_{\text{temp}} \quad (8.7)$$

10. Lasketaan johtimien lukumäärä eri osajohdinten lukumäärällä (tällä hetkellä sallitut osajohtimet 1-3). Jos saatu johtimien lukumäärä on maksimi ja minimiarvon sisällä, siirretään seuraavat arvot käämitystaulukkoon koneen läpilaskentaa varten: levysydämen pituus, tehollisten johdinkierrosten lukumäärä, rinnakkaisten haarojen lukumäärä, osajohtimien lukumäärä, vyyhdenleveys ja johdinkuparin paksuus. Nämä parametrit määrittävät koneen magneettisen tilan, joten muita arvoja ei ole syytä tallettaa.

Kaksistaattorijärjestelmän vaikutus käämityksen muutokseen

Mikäli staattori halutaan tehdä kahdesta erillisestä staattorikäänistä, on käämityksen oltava jaettavissa kahteen haaraan. Tällöin staattorissa on oltava parillinen määrä rinnakkaisia haaroja. Tämä on otettu huomioon käämityksen muutoksessa kohdassa 8, missä lasketaan sallittujen rinnakkaisten haarojen arvot. Kaksistaattorijärjestelmän ollessa kyseessä ehto on yksinkertaisesti:

$$a \bmod 2 = 0 \quad (8.8)$$

Osa peruskoneista on jänteistetty eli vyyhdenlevyitä on kavennettu. Myös tämä otetaan huomioon mitoittaessa moottoria, jossa on kaksi staattorijärjestelmää. Esimerkiksi jaettu käämitys, jossa kaksi staattoria on jaettu koko kehälle samoihin uriin (YY mixed slots), ei salli jänteistystä. Tällaisessa tapauksessa Nestori poistaa koneen jänteistykseen eli se asettaa kolmivaihekoneessa vyyhdenleveydeksi, W :

$$W = 3 \cdot q \quad (8.9)$$

8.5 Metalliteollisuusmoottoreiden laskenta

Metalliteollisuusmoottoreiden kehityksen lähtökohtana oli Shibutanin toteuttama VSD – moottoreiden mitoitusparametrien syöttöikkuna (liite 4) ja siihen liittyvä laskenta. Metalliteollisuusmoottoreiden mitoitusmääritystä kerättiin kyseisten koneiden suunnittelijoilta. Nestoriin toteutettu laskenta ottaa huomioon seikat, jotka ovat tarpeellisia mitoittaessa nopeussäädettyjä moottoreita metalliteollisuuden sovelluksiin. Metalliteollisuuden nopeussäädettyjen moottoreiden mitoituksessa kehityksen painopiste on ollut raja-arvojen määrittämisessä. Erilaisten ylikuormien, jäähdytystavan ja ympäristöolosuhteiden, kuten korkeuden vaikutukset raja-arvoihin, on ohjelmoitu laskentaan. ACS 6000SD –taajuusmuuttajan aiheuttamien lisähäviöiden vaikutusta on tutkittu simulointitulosten avulla. Tuloksien perusteella on kehitetty yhtälöitä ja käyriä, jotka on toteutettu lisähäviöiden osalta Nestorin käyttämään aliohjelman S143. Lisähäviöiden sekä häviöjakauman vaikutuksien huomioiminen virrantiheysrajoissa on puolestaan toteutettu Nestori -laskennassa.

SQL-haun, pituuden ja käämityksen muutoksen jälkeen alkaa varsinainen mitoittaminen, jossa moottori lasketaan eri toimintapisteissä. Laskennassa kullekin peruskoneelle määritetään asiakkaan vaatimusten mukaiset raja-arvot. Näitä raja-arvoja, jotka tarkistetaan, ovat:

- virrantiheydet staattorissa ja roottorissa (S_1, S_2),
- vuontiheydet ilmapälissä, staattorin selässä, staattorin hampaissa ja roottorin napavarressa ($BI, BZ11, B1A, BM$),
- napakulma (δ).

Myös taajuusmuuttajaan liittyviä tarkistuksia tehdään laskennan aikana. Niistä lisää kappaleessa 8.5.2, jossa tutustutaan tarkemmin eri laskentapisteisiin ja niissä tehtäviin tarkastuksiin. Mitoituksen lopussa Nestori asettaa valitut koneet paremmuusjärjestykseen ohjelmoidun logiikan mukaisesti. Valintakriteereistä tarkemmin kappaleessa 8.5.3.

8.5.1 Virrantiheysrajat

Nopeussäädettyjen moottoreiden lämpenemän tarkastelu toteutetaan peruskoneelle asetettujen virrantiheysrajojen mukaan. Moottorin lämpenemään, eli tässä tapauksessa virrantiheysrajoihin, vaikuttavat Nestorin laskennassa seuraavat seikat:

- lämpöluokka (B/F)
- jäähdytys
- koneen pituus
- asennuskorkeus
- ylikuormat
- suuremmat rautahäviöt suurilla taajuuksilla (häviöjakauma)
- taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt

Alla käydään läpi virrantiheysrajojen maksimiarvojen laskenta Nestorissa. Lisäksi esitellään simulointitulokset, joiden perusteella määriteltiin ACS 6000SD – taajuusmuuttajan aiheuttamien lisähäviöiden vaikutus virrantiheysrajoihin.

Lämpöluokka

Lämpöluokka B/F kysytään Nestorin Primarydata -ikkunassa. F-luokka sallii $k_{tempclass}$ kertaa suuremmat virrantiheydet:

$$k_{tempclass} = \sqrt{\frac{T_{maxF} - T_{amb}}{T_{maxB} - T_{amb}}} \tag{8.10}$$

missä

T_{amb}	on ympäristön lämpötila, (45 °C vakioarvo laskennassa)
T_{maxF}	on F-luokan sallima maksimi lämpötila (140 °C)
T_{maxB}	on B-luokan sallima maksimi lämpötila (120 °C)

Eli Nestori sallii 12,5 % suuremmat virrantiheydet, mikäli moottori mitoitetaan F-luokkaan.

Jäähdytyksen vaikutus

Laskennassa lämpenemä perustuu sisään menevän ilman lämpötilaan. Jäähdytyksen vaikutus virrantiheyksiin saadaan seuraavasti:

$T_{coolant}$	on jäähdytysaineen lämpötila
dT_{ic}	on jäähdyttävän aineen ja koneeseen sisälle menevän jäähdytysilman lämpötilaero.
$T_{inletair} = T_{coolant} + dT_{ic}$	on sisään menevän jäähdytysilman lämpötila
T_{amb}	on ympäristönlämpötila
T_{Class}	on lämpöluokan maksimilämpötila
$dT_{max} = T_{Class} - T_{amb}$	on sallittu maksimilämpenemä lämpöluokan mukaan
dT	on laskettavan koneen sallittu lämpenemä

$$dT = dT_{max} - (T_{inletair} - 45\text{ °C}) \tag{8.11}$$

Koska lämpenemä on verrannollinen virrantiheyden neliöön, kerroin virrantiheysrajoille saadaan kaavan 8.12 mukaisesti.

$$k_{coolant} = \sqrt{\frac{dT}{dT_{max}}} \tag{8.12}$$

Metalliteollisuussmoottoreiden virrantiheysrajojen laskennassa otetaan huomioon seuraavat kolme eri jäähdytystapaa:

1. VESI: IC8A6W7, (ulkoiset puhaltimet):
Vesi-ilma –lämmönvaihtimelle jäähdytysveden ja moottorin sisäänmenevän jäähdytysilman lämpötilaero oletetaan olevan 15 °C (parametrinä). Mikäli moottori halutaan mitoittaa 75 K -lämpenemälle(B-luokassa), jäähdytysveden lämpötilan on oltava 30 °C.
2. ILMA-ILMA: IC6A6A6, (ulkoiset puhaltimet)
Ilma-ilma –lämmönvaihtimessa jäähdytysilman ja sisäänmenevän ilman lämpötilaeroksi oletetaan 25 °C (parametrinä). Lämmönvaihtimen jäähdytysilman lämpötilan on oltava 20 °C, mikäli koneelle halutaan 75 K -lämpenemä.
3. KANAVATUULETUS: IC3A7
Kanavatuuletetulle koneelle oletetaan 5 °C (parametrinä laskennassa) lämpötilan nousu jäähdytysilman mennessä koneen sisälle. Jäähdytysaineen lämpötilan on oltava 40 °C, jos halutaan mitoittaa moottori 75 K -lämpenemälle.

Koneen pituuden vaikutus

Lyhyemmälle koneelle voidaan sallia suuremmat virrantiheydet, koska jäähdytysilma jäähdyttää paremmin lyhyempää konetta. Peruskoneella on virrantiheysrajat pisimmälle sekä lyhimmälle mahdolliselle pituudelle. Virrantiheysrajoihin vaikuttava kerroin lasketaan lineaarisesti kaikille mahdollisille pituuksille kaavan 8.13 mukaisesti.

$$k_{length} = \left(\frac{(l_{max} - l_{current}) * \left(\frac{S_{maxL}}{S_{minL}} - 1 \right)}{l_{max} - l_{min}} + 1 \right) \tag{8.13}$$

missä

l_{max}	on peruskoneen maksimipituus
l_{min}	on peruskoneen minimipituus
$l_{current}$	on laskettavan koneen pituus
S_{maxL}	on peruskoneen staattorin tai roottorin virrantiheysraja maksimipituudella
S_{minL}	on peruskoneen staattorin tai roottorin virrantiheysraja minimipituudella.

Korkeuden vaikutus

Yleisesti koneen asennuskorkeus voidaan ottaa huomioon siten, että korkeuden ylittäessä 1000m, sallittua lämpenemää pienennetään 1 % / 100m. Nestorissa laskenta on seuraava (vrt. IEC-taulukot kappaleessa 4.2.2):

$$dT = dT_{\max} - dT_{\max} \cdot \frac{\text{altitude} - 1000}{10000} \quad (8.14)$$

ja edelleen virrantiheyden kertoimeksi, k_{altitude} saadaan

$$k_{\text{altitude}} = \sqrt{\frac{dT}{dT_{\max}}} \quad (8.15)$$

Ylikuormien vaikutus

Eri ylikuormavaatimukset yleensä pienentävät koneelle sallittavia virrantiheyksiä. Laskenta tarkistaa yksinkertaisesti sen, että vaaditut ylikuormat saadaan koneesta ilman ylikuumenemista. Mikäli koneen lämpenemä ei pysy tietyllä ylikuormavaatimuksella F-luokassa, Nestori pienentää virrantiheyttä laskemansa kertoimen mukaan. Erilaisia ylikuormapisteitä voidaan syöttää viisi ja niistä otetaan pahin tilanne huomioon.

Yleensä metalliteollisuusmoottorin lämpöluokka on B ja ylikuormat luvataan lämpöluokkaan F. F -luokka sallii 12,5% suuremmat virrantiheydet kaavan 8.10 mukaisesti.

Jatkuva ylikuormitus (*Continuos*, 3h, 2h, 1h) otetaan huomioon seuraavasti:

$$k_{\text{continuos}} = \sqrt{\frac{k_{\text{tempclass}}}{\text{Overloadpros}/100}} \quad (8.16)$$

missä

$k_{\text{tempclass}}$ lämpöluokan kerroin (kaava 8.10)

Overloadpros on ylikuorma prosenteissa esim. jatkuva ylikuorma 115%.

Jaksollisesti toistuvan (*Frequent*) sekä satunnaisen (*Occasional*) hetkellisen ylikuorman tapauksessa tulee varmistua siitä, että moottorin lämpenemä pysyy määrättyssä lämpöluokassa. Jaksollisesti toistuvan ylikuormituksen tapauksessa tutkitaan sekä yhden kuormituspulssin että keskimääräisen tehon vaikutusta virrantiheysrajoihin. Kertoimeksi valitaan pahempi vaihtoehto eli pienempi kerroin. Hetkellisessä ylikuormitustilanteessa tutkitaan vain yhden kuormituspulssin vaikutusta ylikuormiin.

Tahtimoottoria kuormitettaessa sen lämpeneminen noudattaa likimäärin kaavan 8.17 mukaista eksponenttiyhtälöä. Aikavakiot asetetaan kohdalleen koestustuloksien perusteella ja annetaan parametrinä peruskoneelle (Lampola, 2003).

$$dT = T_{\text{amb}} + dT_{\text{start}} + k_{\text{Cu}} \left(\left(\frac{I}{I_n} \right)^2 - \frac{dT_{\text{start}}}{dT_{\text{max}}} \right) \cdot (dT_1 \cdot (1 - e^{-t_1/\tau_1}) + dT_2 \cdot (1 - e^{-t_2/\tau_2}))$$

$$k_{\text{Cu}} = \frac{235 + T_{\text{amb}} + dT_{\text{start}} + dT_n}{235 + T_{\text{amb}} + dT_{\text{max}}} \quad (8.17), (8.18)$$

missä

T_{amb}	on ympäristön lämpötila
dT_{start}	on lähtölämpötila, jossa ylikuorma alkaa (yleensä B-luokan suurin sallittu lämpenemä)
dT_{max}	on B-luokan suurin sallittu lämpenemä
dT_1	on lämpötilan muutos (1)
dT_2	on lämpötilan muutos (2)
dT_n	on lämpötilan muutos
τ_1	on lämpenemisen aikavakio
τ_2	on toinen lämpenemisen aikavakio
t_1	on aika
t_2	on toinen aika
$\left(\frac{I}{I_n} \right)^2$	on ylikuorma suhteellisarvona
k_{Cu}	on kuparin resistanssin lämpötilakorjaus

Virrantiheyksille saadaan kerroin kaavan 8.19 mukaisesti, jos lämpenemä ylittää lämpöluokan salliman rajan kyseisellä ylikuormalla ($dT > dT_{\text{max}}$). Muulloin kerroin on yksi.

$$k_{\text{Occasionally}} = \sqrt{\frac{dT_{\text{max}}}{dT}} \quad (8.19)$$

Jaksollisesti toistuvan ylikuorman keskimääräinen teho, P_{ave} [p.u.] lasketaan seuraavasti:

$$P_{\text{ave}} = \sqrt{\frac{P_{\text{overload}}^2 \cdot t_{\text{load}} + P_{\text{noload}}^2 \cdot t_{\text{noload}}}{t_{\text{load}} + t_{\text{noload}}}} \quad (8.20)$$

missä

P_{overload}	on ylikuormateho p.u. arvona
P_{noload}	on oletettu teho tyhjäkäynnillä p.u. arvona (oletus $0.2 \cdot P_n$)
t_{load}	on kuormitus aika
t_{noload}	on tyhjäkäyntiaika

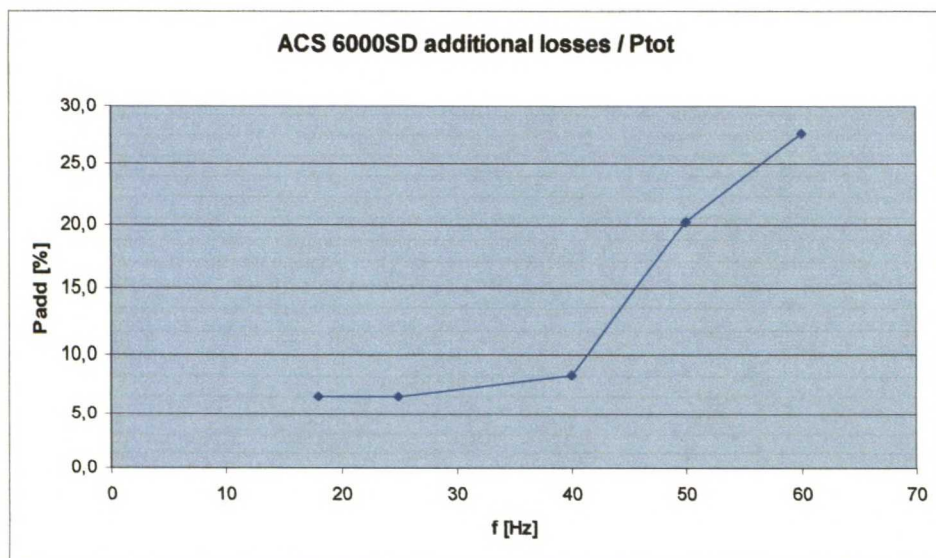
Ja kerroin virrantiheyksille

$$k_{\text{Pave}} = \sqrt{\frac{k_{\text{tempclass}}}{P_{\text{ave}}}} \quad (8.21)$$

Taajuusmuuttajan sähkökoneessa aiheuttaminen lisähäviöiden vaikutus

ACS 6000SD –taajuusmuuttajan sähkökoneessa aiheuttamia lisähäviöitä tutkittiin FEM –simulointien avulla, FCSMEK:llä. Tutkimuksen kohteena oli AMZ 0900_06 nopeussäädetty tahtimoottori. Toisin sanoen moottori oli kuusinapainen ja akselikorkeus 900 mm. Samasta moottorista mitoitettiin FEM –simulointeja varten viisi eri nimellispisteen moottoria taajuuksille 18, 25, 40, 50 ja 60 Hz. Moottoreiden nimellistehot olivat 4,5 ja 10 MW välillä. Kullekin taajuudelle generoitiin liitteen 2 mukaiset ACS 6000SD:n jännitemallit, jotka toimivat jännitelähteenä FEM –simuloinneissa. Taajuusmuuttajan aiheuttamia lisähäviöitä tutkittiin vertaamalla sinisyöttöisen ja taajuusmuuttajalla syötetyn FEM –simulaatioiden tuloksia keskenään.

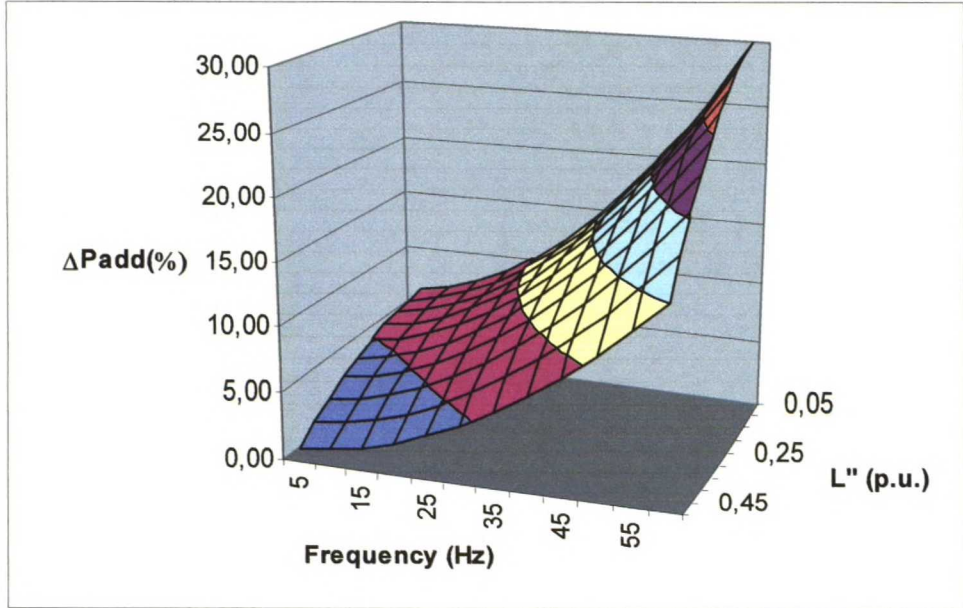
Liitteessä 9 on esitetty simulointituloksista tehty kuvaajat. Kuvaajissa on eritelty FCSMEK:llä simuloitujen häviöiden suuruudet eri häviökomponenteissa sekä sini- että taajuusmuuttajasyötöllä. Kuvaajista voimme havaita, että taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt ovat suurimmaksi osaksi navan pinnalla ja vaimennussauvoissa syntyviä häviöitä. Kun verrataan simulointitulosten taajuusmuuttajan aiheuttamia lisähäviöitä kokonaishäviöihin (poislukien hankaus- ja kitkahäviöt), taajuusmuuttajan lisähäviöt kasvavat taajuuden funktiona kuvassa 8.1 esitetyn käyrän mukaisesti.



KUVA 8.1 Kuvassa erään koneen ACS 6000SD taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt suhteutettuna sähkömagneettisiin kokonaishäviöihin, P_{tot} . (Huom! Häviöprosentit eivät ole vertailukelpoisia, koska luottamuksellisista syistä tuloksia on skaalattu.)

ACS 6000SD –taajuusmuuttajan aiheuttamien lisähäviöiden suuruuteen vaikuttaa myös moottorin alkutilan induktanssi (L''). Moottorin taajuus vaikuttaa puolestaan reaktanssien suuruuteen. Moottorin taajuuden kasvaessa moottorin staattorikäämin tehollisia kierroksia tarvitaan vähemmän, jolloin koneen induktanssit pienenevät. Alkutilan induktanssin suuruuteen vaikuttavat koneen kaikki käämit. Induktanssien pienentyessä myös alkutilan induktanssin absoluuttinen arvo pienenee. Parhaiten alkutilan induktanssiin voidaan vaikuttaa lisäämällä staattorin tehollisia käämikierroksia (löysentämällä konetta = suurempi kone) tai tekemällä muutoksia vaimennuskäämiin.

Induktanssin suuruuden vaikutusta taajuusmuuttajan aiheuttamiin lisähäviöihin sähkökoneessa tutkittiin FEM – simulointitulosten perusteella. Tutkimuksessa käytettiin hyväksi samoja AMZ 0900_06 tahtimoottorisarjan simulointituloksia hyväksi. Kuvassa 8.2 on esitetty ACS 6000SD –taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt taajuuden ja alkutilan induktanssin funktiona.



KUVA 8.2 ACS 6000SD –taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt sähkökoneessa taajuuden ja alkutilan induktanssin funktiona. (Huom! Häviöprosentit eivät ole vertailukelpoisia, koska luottamuksellisista syistä tuloksia on skaalattu.)

Yllä esitetty 3D –kuva toteutettiin ohjelmallisesti S143 –aliohjelmaan. Näin analyttiseen mitoitusohjelmaan, THW:en, saadaan taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt, P_{add2} .

Nestorissa taajuusmuuttajan ja suuren taajuuden vaikutus virrantiheyksiin on toteutettu kahdella vaihtoehdoisella tavalla:

1. Häviöjakaumaan perustuva virrantiheyksien laskenta ottaa huomioon moottorin kaikki sähkömagneettiset häviöt. Kertoimien avulla määritetään se, kuinka paljon kyseiset häviöt vaikuttavat staattorin tai roottorin lämpenemään. Kaava 8.22 ottaa huomioon staattorin kupari- ja rautahäviöjakauman lisäksi myös taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt. Staattorin suurin sallittu virrantiheys pienenee rauta- ja lisähäviöiden kasvaessa. Laskennassa on mukana myös rajataajuus, f_{limit} , jonka avulla määritetään kaavan vaikutusalue rajataajuudesta moottorin suurimpaan sallittuun taajuuteen saakka, f_{max} .

$$S_1 = \sqrt{1 - \frac{k_{fe/cu} * P_{fe} + k_{add,st} * (P_{add2} + P_{add} + P_{nap})}{P_{Cu}}} * S_{1max} \quad (8.22)$$

Roottorin suurimpaan sallittuun virrantiheyteen vaikuttavat roottorin magnetointihäviöiden lisäksi taajuusmuuttajan lisähäviöt. Navan pinta-, P_{nap} ja

taajuusmuuttajan aiheuttamien lisähäviöiden, P_{add2} vaikutus roottorin lämpenemään arvioidaan kertoimen $k_{add,Rt}$ avulla.

$$S_2 = \sqrt{1 - \frac{(P_{add2} + P_{add} + P_{nap}) * k_{add,Rt}}{P_{field}}} * S_{2max} \quad (8.23)$$

2. Toinen tapa perustuu koestustuloksista laskettavissa oleviin virrantiheys rajoihin. Kyseessä on yksinkertainen malli, jossa suurimmat sallitut virrantiheysrajat määritetään taajuuden funktion kaavan 8.24 mukaisesti. Yksinkertaisessa mallissa staattorin ja roottorin virrantiheysrajat lasketaan lineaarisesti rajataajuuden ja maksimitaajuuden välillä.

$$S_x = \left(\frac{(f_{current} - f_{limit}) * \left(\frac{S_{maxf} - 1}{S_{max}} \right)}{f_{max} - f_{limit}} + 1 \right) * S_{max} \quad (8.24)$$

Edellä esiteltyjen kaavojen parametrit, joita ei saada S143 –aliohjelmasta, syötetään peruskoneelle peruskoneen parametrien syöttöikkunassa. Kuvassa 8.3 on Nestorin peruskoneen syöttöikkunan osa, jossa kyseiselle peruskoneelle syötetään tarvittavat parametrit laskentaa varten.

Default texts		Deliv. times		Details		VSD parameters		Log													
Current density and length				Current density and ACS6000SD				Constants for temperature-rise calculations													
<p>1.) Current density at maximum frequency:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Basemachine</th> <th colspan="2">At max frequency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stator</td> <td>5,1 A/mm²</td> <td></td> <td>A/mm²</td> </tr> <tr> <td>Rotor</td> <td>3,3 A/mm²</td> <td></td> <td>A/mm²</td> </tr> </tbody> </table>										Basemachine		At max frequency		Stator	5,1 A/mm ²		A/mm ²	Rotor	3,3 A/mm ²		A/mm ²
Basemachine		At max frequency																			
Stator	5,1 A/mm ²		A/mm ²																		
Rotor	3,3 A/mm ²		A/mm ²																		
<p>2.) Parameters for max allowed current density calculations:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Stator</th> <th colspan="2">Rotor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>kFe/Cu</td> <td></td> <td>kadd,Rt</td> <td></td> </tr> <tr> <td>kadd,St</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										Stator		Rotor		kFe/Cu		kadd,Rt		kadd,St			
Stator		Rotor																			
kFe/Cu		kadd,Rt																			
kadd,St																					
<p>Note: Use only ONE of previous methods (1/2) for derating current densities due to ACS6000SD.</p>																					
								Frequency limit	40 Hz												

KUVA 8.3 Ote Nestorin peruskoneen parametrien syöttöikkunasta, parametrit VSD –moottoreille (ACS 6000SD –käyttöille).

Tulokset ovat lähellä verrattuna muutamiin olemassa oleviin referensseihin. Tosin koestustuloksiin vertaaminen on tässä tapauksessa hankalaa, koska 'oikeiden' rautahäviöiden suuruutta voimme arvioida vain tietyllä tarkkuudella. Lisäksi ACS 6000SD –taajuusmuuttajakäyttöjen mittaustuloksia on olemassa vasta hyvin vähän. Tämän takia työn tuloksiin ei ole liitetty mittaustuloksien vertailua.

Myös FEM -simulointitulosten tarkkuus on otettava huomioon tuloksia analysoitaessa. FCSMEK:n laskentulos poikkeaa todellisuudesta. Esimerkiksi rautahäviölaskennan yksinkertaistukset vaikuttavat rautahäviöiden suuruuteen. Lisäksi tulokset ovat vain yhden runkokoon moottorista eli otos on varsin pieni

8.5.2 Laskentapisteet ja tarkistukset

Mitoituksessa kone lasketaan monessa eri toimintapisteessä, jotta moottorille pystytään toteuttamaan tarvittavat tarkistukset. Virran- ja vuontiheyksien tarkistuksien lisäksi on tehtävä myös muita tarkistuksia, joilla pystytään varmistumaan siitä, että moottori täyttää vaaditut ylikuormavaatimukset. Taulukossa 8.3 on listattu metalliteollisuusmoottoreiden mitoituksen laskentapisteet ja niissä tehdyt tarkistukset.

TAULUKKO 8.3 Metals –moottoreiden laskentapisteet ja raja-arvojen tarkistukset.

Indeksi	Laskentapiste	Tarkistus
1	Nimellispiste	$S1, S2, ACS\ 6000SD:n$ jännitevara
2	Maksiminopeus-maksimiteho	Napakulma
3	Kentänheikennyspiste	Vuontiheydet ($BI, B1A, BZ11, BM$)
4	Maksiminopeus-nimellisteho	
5	Nimellisnopeus-maksimiteho	Magnetointivirta (I_f)

Napakulma, δ

Tarkistetaan, että moottori pysyy tahdissa, kun siitä otetaan vaadittu maksimimomentti. Jotta kone pysyy tahdissa, on napakulman oltava alle 90° , kun ei huomioida dynaamisia muutostilanteita. Napakulmaa voidaan kuitenkin säätää magnetointijännitteellä, joten ylimagnetoinnilla voidaan suurentaa moottorin lyhytaikaista ylikuormitettavuutta.

Roottorivirta, I_f

Tarkistetaan, että moottori ei kyllästy liikaa maksimiteholla. Moottorin kyllästyessä tarvittava magnetointivirta kasvaa, joten maksimiteholla tarkistetaan, että magnetointi virta ei ole suurempi kuin ylikuormaprosentin ja nimellispisteen magnetointivirran tulo.

Taajuusmuuttajan jännitevara

Tarkistetaan, että taajuusmuuttajassa 'riittää jännite'. Toisin sanoen vaadittu ylikuorma on saavutettava invertterin maksimijännitteellä staattoriresistanssin jännitehäviö mukaan luettuna kaavan 8.25 mukaisesti:

$$U_{INU,max} > U_n - \sqrt{3} \cdot R_s \cdot I_s \cdot Overloadpros$$

(8.25)

missä

$U_{INU,max}$	on ACS 6000SD –taajuusmuuttajan maksimisyoöttöjännite,
U_n	on moottorin nimellisjännite,
R_s	on staattoriresistanssi,
I_s	on staattorin nimellisvirta.

8.5.3 Koneen valintakriteerit

Asiakkaan vaatimukset täyttävät koneet asetetaan hyväksytyjen koneiden taulukkoon. Hyväksytyjä koneita voi olla muun muassa eri poikkileikkauksella, pituudella ja käämitysvaihtoehdolla. Kaikki koneet asetetaan Nestoriin ohjelmoidun logiikan mukaisesti paremmuusjärjestykseen, joista paras valitaan lopulliseksi tulokseksi. Käyttäjä voi myös itse valita haluamansa koneen hyväksytyjen koneiden listalta laskennan jälkeen.

Valintakriteereitä on monia. Oletuksena Nestori valitsee pienimmän akselikorkeuden ja lyhimmän koneen, jossa on vähiten osajohtimia. Muita valintakriteereitä ovat esimerkiksi hyötysuhde, momentti tai valmistukseen tarvittavat työkalut.

8.6 Azipod- ja potkurimoottoreiden laskenta

Azipod- ja potkurimoottoreiden laskenta Nestorissa etenee pääpiirteissään samalla tavalla kuin metalliteollisuusmoottoreillakin. Ne käyttävät laskennassa samoja käämityksen ja pituuden muutosproseduureja. Sekä Azipod- että potkurimoottori laskennalle on Nestorissa omat mitoituksen pääproseduurit, jossa mitoitettavat koneet lasketaan läpi ja tehdään tarkistukset. Potkurimoottoreiden ja Azipodien lämpenemään eli virrantiheysrajoihin vaikuttavat:

- lämpöluokka (potkurimoottoreilla yleensä B, Azipodeilla yleensä F)
- jäähdytys (jäähdytystapa: vesi-ilma lämmönvaihdin, symmetrinen jäähdytys)
- jäänmurtajamoodi

Jäähdytys

Potkurimoottoreilla ja Azipodeilla on laskennassa mukana vain vesi-ilma lämmönvaihdin (IC8A). Potkurimoottorille on oletuksena 15 C lämpötilan nousu, kun jäähdytysveden lämpötila on 30 C. Azipodeilla vastaava lämpötila on oletuksena 9 C, kun jäähdytysveden lämpötila on 36 C. Kummassakin tapauksessa voidaan sisäänmenevän ilman lämpötilaa muuttaa laskennan lähtöparametreissä. Sisäänmenevän ilman referenssinä on 45 C eli 75 tai 95 K lämpenemä.

Jäänmurtajamoodi

Potkurimoottoreilla kuten myös Azipodeilla on mahdollista mitoittaa niin sanottu jäänmurtajamoodi. Jään murtajamoodilla voidaan moottorista luvata tietty ylikuorma kylmemmällä jäähdytysilmalla.

Laskentapisteet ja tarkistukset

Suurin ero metalliteollisuusmoottoreiden mitoitukseen on se, että Nestori määrittää potkuripisteen perusteella moottorin muut toimintapisteet.

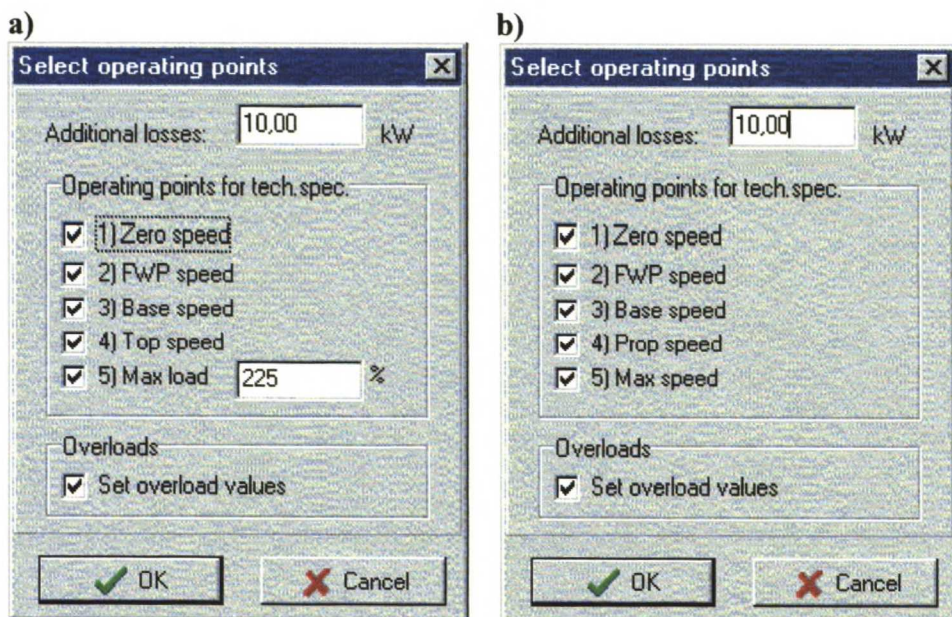
TAULUKKO 8.4 Marine –moottoreiden laskentapisteet ja raja-arvojen tarkistukset.

Indeksi	Laskentapiste	Tarkistus
1	Kentänheikennyspiste	Vuontiheydet (BI, B1A, BZ11, BM)
2	Nimellispiste	SI, S2
3	Potkuripiste	
4	Maksiminopeus – maksimiteho	

8.7 Tekninen spesifikaatio

Nestorin mitoituksen lopputuloksena saadaan tekninen spesifikaatio Nestorin tarjouksen liitteeksi. Nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden teknistä spesifikaatiota varten on olemassa yksi Microsoft Word –pohja, jota ohjelmallisesti muokkaamalla saadaan eri säätökäyttösovelluksille sopiva spesifikaatio.

Spesifikaatio on oltava muuteltavissa asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Tätä varten Nestoriin tehtiin nopeussäädettyjen moottoreiden spesifikaation tulostusta varten syöttöikkuna, missä voi valita spesifikaatioon tulostettavat toimintapisteet. Ikkunan toimintapisteet muuttuvat sovelluksen mukaan, kuten kuvista 8.4 a) ja b) voimme havaita. Lisäksi ikkunassa voi syöttää lisähäviöitä, jotka vaikuttavat spesifikaatiossa tulostettavaan hyötysuhteeseen.



KUVA 8.4 Nestorin teknisen spesifikaation tulostusasetusten syöttöikkuna. a) metalliteollisuus moottoreiden spesifikaatio, b) Azipod- ja potkurimoottoreiden spesifikaatio.

9 Johtopäätökset

9.1 Työn tuloksista

Työssä toteutettiin tavoitteiden mukaisesti toimiva nopeussäädettyjen avonapaisten tahtikoneiden mitoittaminen tarjouslaskentaohjelma Nestorissa. Laskenta alkaa asiakkaan vaatimusten täyttämisestä ja päättyy tekniseen spesifikaatioon, joka tulostetaan varsinaisen tarjouksen liitteeksi. Laskenta esiteltiin pääpiirteissään luvussa 8. Tässä kappaleessa analysoidaan lyhyesti, mikä tämän työn yhteydessä onnistui hyvin ja mikä huonosti.

Nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoittukseen vaikuttaa oleellisesti sen sovelluskohde. Mitoituksessa voidaan nyt ottaa huomioon yleisimpien sovellusten erityisvaatimukset. Sovellukset on jaettu kolmeen ryhmään:

1. metalliteollisuusmoottorit
2. tavalliset potkurimoottorit
3. Azipod -ruoripotkurimoottorit

Jako mahdollistaa eri sovellusten mitoituksen kehittämisen ja päivittämisen muista riippumatta. Kuitenkin siten, että mitoituksen ydin (pituuden ja käämityksen muutos - proseduurit) on sama kaikilla. Näin vähennetään ohjelmointityön määrää, mikäli perusmitoitukseen tarvitsee tehdä muutoksia.

Laivakäyttöjen mitoituksen pohjana ollut Bemari oli tehty syklokonverterikäyttöjä varten. Nestori laskenta tukee sekä syklokonverterilla (ACS 6000c) että DTC - ohjatulla jännitevälipiirillisellä taajuusmuuttajalla (ACS 6000SD) ohjattujen käyttöjen mitoitusta. Koska ACS 6000SD -käytöistä on olemassa vasta vähän referenssikoneita etenkin taajuusalueella 40-60 Hz, jouduttiin tässä työssä tyytymään FEM - simulaatioiden tuloksiin. Tuloksien pohjalta toteutetut kaavat Nestorissa ovat vain suuntaa antavia, mutta riittävän tarkkoja mitoittaessa konetta ensimmäisen kierroksen tarjousta varten. Ohjelmaa on kuitenkin päivitettävä tietämyksen lisääntyessä varsinkin suuren taajuuden tahtimoottoreiden osalta.

Nestori käyttää samoja raja-arvoja ja ohjelmia kuin sähkölaskija suunnitellessaan konetta. Raja-arvojen määrittämistä varten tietämystä kerättiin eri sovellusten suunnittelijoilta ja tuotekehityksen asiantuntijoilta. Tämän tietämyksen keruu onnistui hyvin tässä työssä, koska mukana oli noin 10 motivoitunutta alan ammattilaista. Tiedon jalostaminen Nestorin ohjelmakoodiksi oli aikaa vievää työtä. Nestoriin pyrittiinkin ohjelmoimaan vain oleelliset asiat. Myös analyttiseen mitoitusohjelmaan S143:een tehtiin muutamia muutoksia tämän työn aikana. Voidaan todeta, että ohjelmointityö onnistui kokonaisuudessa hyvin. Tosin nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoittaminen on erittäin laaja ja haastava aihealue, jota ei saa täydelliseksi yhden diplomityön aikana. Työtä tehdessä tuli paljon erilaisia jatkokehitys ideoita. Niistä tärkeimpiä käydään tarkemmin läpi seuraavassa kappaleessa.

9.2 Jatkokehitys

Nestorin versio 4.20 on tällä hetkellä ABB Oy Sähkökoneiden Tahtikoneet – tulosyksikön myyjien käytössä. Nopeussäädettyjen moottoreiden myynnin osalta Nestorilla on noin kymmenkunta käyttäjää. Metalliteollisuusmoottoreiden tarjoukset tehdään lähes kaikki Nestorilla. Potkurimoottoreiden ja Azipodien tarjouksia tehdään vielä tässä vaiheessa myös Bemarilla. Webbi-Nestorin kehityksen myötä on tarkoitus, että kaikki tahtikoneiden tarjoukset tehdään Nestorin laskentalogiikkaan perustuen.

Peruskoneiden päivitystyö on Nestorin kehityksessä avainasemassa. Etenkin se korostuu nopeussäädettyjen moottoreiden mitoituksessa, missä peruskoneen läpileikkaus pysyy samana laskennan aikana. Tämän työn yhteydessä tehtiin Azipod Cyclo –peruskoneet valmistettujen referenssikoneiden perusteella. Azipod DTC –peruskoneet vaativat kuitenkin vielä lisätyötä. Raja-arvojen määrittäminen on niiden osalta haastavaa, koska valmistettuja referenssikoneita ei vielä tällä hetkellä ole. Toinen kriittinen peruskoneiden päivityskohta on Metals1 –peruskoneryhmän koneet. Niiden raja-arvot tulee päivittää nykytilanteen tasalle, missä ACS 6000SD –taajuusmuuttajalla on mahdollista ohjata tahtimoottoreita jopa 75 Hz taajuuteen asti. Mitoitussääntöjen ja peruskoneiden raja-arvojen osalta Nestori vaatii jatkuvaa ylläpitoa. Tämä on kyseisten koneiden suunnittelijoiden tehtävä ylläpitää tätä tietämystä Nestorissa. Myös tuotekehitysosastolla on merkittävä osuus peruskoneiden määrittämisessä ja lämpenemätarkasteluissa.

Nopeussäädettyjen moottoreiden lämpenemän tarkastelu on ongelmallista, koska moottorin jäähtymisen ilmankierto on yleensä toteutettu erillisillä ulkoisilla puhaltimilla. Ennen lämpenemätarkastelua tulisi koko jäähtytysjärjestelmä mitoittaa ensin. Tämän takia generaattoreiden ja DOL –moottoreiden laskennan lämpenemän tarkasteluun käytetty lämpöverkko-ohjelma S125 ei anna riittävän tarkkoja tuloksia. Siksi Nestorin laskennassa moottorin lämpenemä rajoitetaan virrantiheysrajojen mukaan. Virrantiheysrajoihin perustuva lämpenemän rajoitus on toimiva silloin, kun mitoittetaan moottoreita, joiden nimellistaajuus on alhainen. Tällöin moottorin häviöjakauma on kuparihäviöpainotteinen. Taajuuden kasvaessa pyörrevirta- ja hystereesihäviöt kasvavat moottorin rautaosissa, jolloin rautahäviöt saattavat kasvaa suuremmiksi kuin kuparihäviöt. Suuren taajuuden koneita varten toteutettu laskenta, joka ottaa huomioon koneen häviöjakautuman on mielestäni siirtymävaihe lämpöverkkolaskentaan nopeussäädettyjen moottoreiden mitoituksessa. Lämpöverkko-ohjelman, S125 integrointi nopeussäädettyjen moottoreiden mitoitukseen vaatisi paljon testaustyötä etenkin eri jäähtytystapoihin liittyen. Se olisikin yksi potentiaalinen jatkotutkimuksen kohde tälle työlle.

Toinen jo käynnissä oleva kehitysprojekti Nestori –mitoituksessa on sen käyttöliittymän toteuttaminen Internet –sovelluksena, Webbi-Nestorissa. Tämän työn tuloksena Nestorissa on olemassa kaikille konetyypeille omat mitoitusproseduurinsa, joita voidaan käyttää hyväksi Webbi-Nestoria toteutettaessa. Nopeussäädettyjen moottoreiden mitoitus vaatii kuitenkin käyttäjältä vähintään perustietämystä sähkökoneista ja niiden eri toimintapisteistä. Internet –sovellus tuo kuitenkin mukanaan monia etuja. Sovelluksen kehittyessä myös asiakas itse voi mitoittaa koneen asettamiensa vaatimusten mukaan. Tällöin peruskoneiden ja niiden raja-arvojen ja muiden tietojen päivitys on entistä tärkeämmässä asemassa. Tietojen on oltava aina ajan tasalla ja oikein.

10 Yhteenveto

Avonapaiset tahtimoottorit ovat yleistyneet viimevuosina nopeussäädetyissä käytöissä. Tämän on mahdollistanut taajuusmuuttajien kehitys. LCI- ja syklokonvertterikäyttöjen lisäksi jännitevälipiirilliset DTC-ohjatut taajuusmuuttajat ovat tulleet potentiaalisiksi vaihtoehdoksi tahtimoottorin ohjauksessa. ACS 6000SD –taajuusmuuttajalla on mahdollista ohjata jopa 27 MW tahtimoottoreita 8-65 Hz taajuusalueella.

Nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden momentti määräytyy sovelluksen aiheuttaman vastamomentin mukaan. Tämän takia sovellus kertoo jo paljon mitoittavalta moottorilta vaadittavista ominaisuuksista. Nopeussäädetyille tahtimoottoreille on olemassa paljon erilaisia sovelluskohteita. Yleisimpiä sovelluskohteita ovat kuitenkin metalliteollisuus sekä laivojen potkurikäytöt, joiden mitoittamiseen tässä työssä pääasiassa keskityttiin.

Koska tahtimoottorit valmistetaan lähes aina asiakkaan vaatimusten mukaisesti, tarjouslaskentaohjelma on erittäin tärkeässä asemassa tilaus-toimitusprosessin alussa. Tarjouksen ja sen liitteenä olevan teknisen spesifikaation tulee olla mahdollisimman tarkka ja tarjottavien koneiden on oltava sekä teknisesti että taloudellisesti mahdollisimman optimaalisia. Tahtikoneiden mitoitus tietämystä on kerätty ja jalostettu Nestorissa toimivaksi kokonaisuudeksi. Lisäksi Nestorin käyttämissä tietokannoissa on paljon muuta tarjouksen tekoon ja projekteihin liittyvää dataa, kuten esimerkiksi koneiden ja niiden varusteiden hintatiedot. Peruskoneisiin perustuva mitoittaminen ohjaa hyviksi havaittuihin standardiratkaisuihin. Niissä on tallennettuna suunnittelijoiden tietämys sekä mekaanisista että sähköisistä raja-arvoista ja mitoista.

Työn tuloksena päivitetty Nestorin versio 4.20 tukee nyt generaattoreiden ja DOL –moottoreiden lisäksi sekä metalliteollisuuden että laivojen potkurikäyttöjen nopeussäädettyjen tahtimoottoreiden mitoitusta. Toteutettu VSD –mitoitus tehtiin asiakkaan vaatimuksien täyttämiseksi teknisen spesifikaation Microsoft Word –dokumentin automaattiseen luomiseen saakka. Käyttöliittymän ja syklokonvertterikäyttöjen mitoituksen osalta ohjelmointityön lähtökohtana Nestorin metalliteollisuusmoottoreiden mitoituksen lisäksi oli Bemari –tarjouslaskentaohjelma. Bemarin toiminnot integroitiin Nestoriin ja sen lisäksi kerättiin ACS 6000SD –taajuusmuuttajalla ohjattujen moottoreiden mitoitus tietämystä, joka ohjelmoitiin myös Nestorin mitoitukseen. Kehityksen kohteena olivat termisten ja sähköisten raja-arvojen määrittämiseen liittyvä laskenta. Sen lisäksi kaksistaattorijärjestelmän käämityssäännöt eri käämitystavoilla otettiin huomioon laskennassa.

Simulointitulokset taajuusmuuttajan lisähäviöistä ja niiden perusteella tehdyt muutokset analyttiseen mitoitus aliohjelmaan, S134:een, toteutettiin myös tämän työn aikana. Nestorin nopeussäädettyjen moottoreiden peruskoneille toteutettiin laskenta, joka ottaa taajuusmuuttajan aiheuttamien lisähäviöiden lisäksi myös moottorin häviöjakauman huomioon virrantiheyslaskennassa.

Lähdeluettelo

ABB Oy 2000. **Teknisiä tietoja ja taulukoita.** Suomalaiset ABB-yhtiöt, Sivu 466.

ABB Industry Oy 2001. **ACS 6000C Cycloconverter, System Description.** Ei yleisesti saatavilla.

ABB Schweiz AG 2002. **ACS 6000SD Medium-voltage Drives, Technical Catalog.** Ei yleisesti saatavilla.

Arkkio, Antero 2000. **FCSMEK, PART C, USER'S GUIDE.** Helsinki University of Technology. Laboratory of Electromechanics. Espoo. Sivu 4.

Arkkio, Antero 2003. **Mallinnus ja simulointi sähkömekaniikassa.** Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Sähkömekaniikan laboratorio. Luentomateriaali. Sivu 20.

Aura, L. & Tontteri, A. J. 1985. **Sähkömiehen käsikirja 3, Tehoelektroniikka ja sähkökoneiden käyttö.** WSOY. ISBN 951-0-13473-2. Luku 4.

Burzanowska, H. & Pohjalainen, P. 1990. **Modelling and simulation of PWM inverter-fed variable speed motor drive.** Nancy. France. IMACS –julkaisu. Sivu 319.

Heinonen, Risto 2000. **Elektroniikka- ja sähköalan kehitysnäkymät 2000...2005.** Espoo, VTT Automaatio, Sivu 172.

INSKO Ry, 1986. **Sähkömoottorit.** Helsinki, Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus. ISBN 951-794-908-1. Julkaisu 24-86. Luku 3.

Jaakkola, Jouni 1995. **Tahtikoneen myyntitukiohjelman kehitys.** Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Sähkömekaniikan laboratorio. Diplomityö. Sivu 39.

Jokinen, Tapani 1982. **Pyörivän sähkökoneen suunnittelu.** Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Sähkömekaniikan laboratorio. Opetusmoniste. Sivu 55.

Kaukonen, Jukka 2003. **Sähköpostiviesti.** Helsinki, ABB Oy Sähkökoneiden Tahtikoneet –yksikkö

Kyyrä, Jorma 2001. **Suuntaajatekniikka.** Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Tehoelektroniikan laboratorio. Opetusmoniste. Sivu 24.

Luomi, Jorma 1994. **Sähkömekaniikan numeeriset menetelmät.** Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Sähkömekaniikan laboratorio. Opetusmoniste. Sivu 7.

Luomi, Jorma 2002. **Sähkökäyttöjen ohjaus.** Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Tehoelektroniikan laboratorio. Opetusmoniste. Kappale 5.5.

Luomi, J., Niiranen, J. & Niemenmaa, A. 2001. **Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt**. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Sähkömekaniikan & Tehoelektroniikan laboratorio. Opetusmoniste. Sivut 35, 112, 115, 121.

Mantere, Juhani 1995. **Tahtikoneiden käyttösovelluksia**. Helsinki, ABB Oy
Sähkökoneiden tietämyskanta. Ei yleisesti saatavilla.

Niiranen, Jouko 1999. **Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus**. Otatieto. ISBN 951-672-270-9. Sivut 15, 16, 36.

Paloniemi, P. & Keskinen, E. 1990. **Sähkökoneiden eristykset**. Espoo, Teknillinen korkeakoulu. Sähkömekaniikan laboratorio. Opetusmoniste.

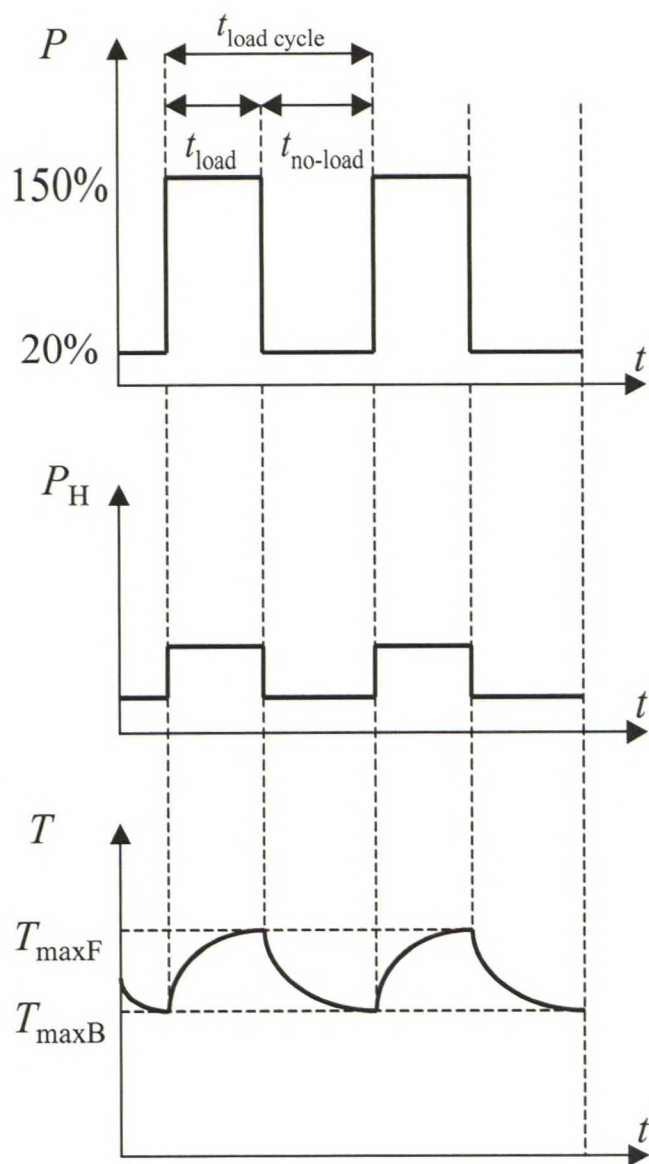
Puolanne, Heikki 2000. **Suuritehoisten jännitevälipiirillisten taajuusmuuttajien konseptit ja vaikutukset laivan sähköisessä potkurijärjestelmässä**. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Tehoelektroniikan laboratorio. Diplomityö. Sivu 12.

Pyrhönen, Juha 2001. **Sähkökäytöt**. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Sähkökäyttötekniikan laboratorio. Opetusmoniste. Sivu 89.

Segercrantz, Henrik 2000 / Kvaerner Masa-Yards. **Marine Propulsion International, SEPTEMBER 2000**. Lehtiartikkeli.

Shibutani, John 1998. **Tahtimoottorin mitoitusohjelman kehittäminen myynnin ja suunnittelun tarpeisiin**. Espoo, Teknillinen korkeakoulu, Sähkömekaniikan laboratorio. Diplomityö. Sivu 37, 51.

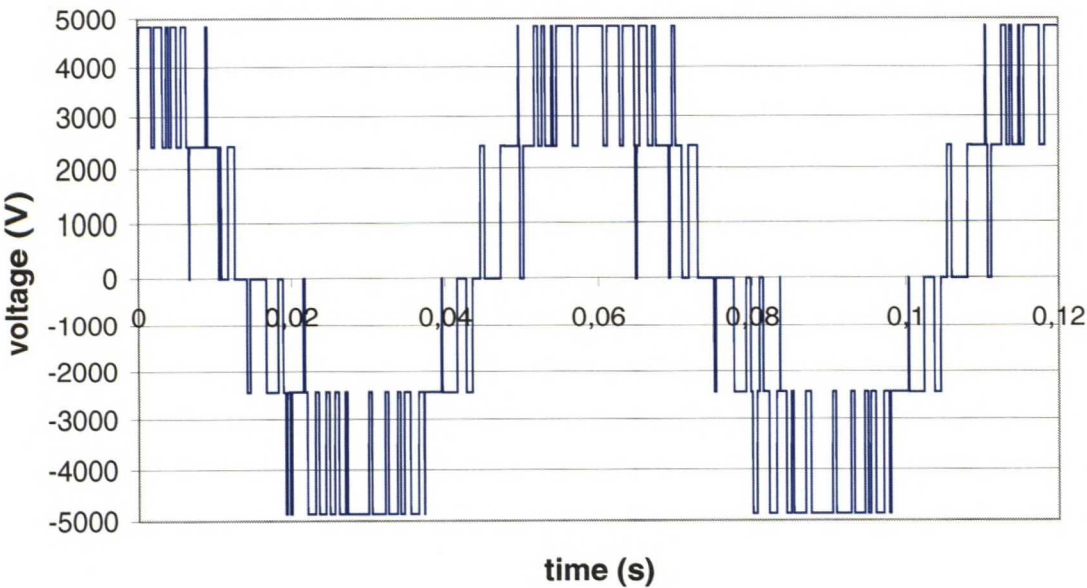
LIITE 1: Jaksollinen ylikuorma



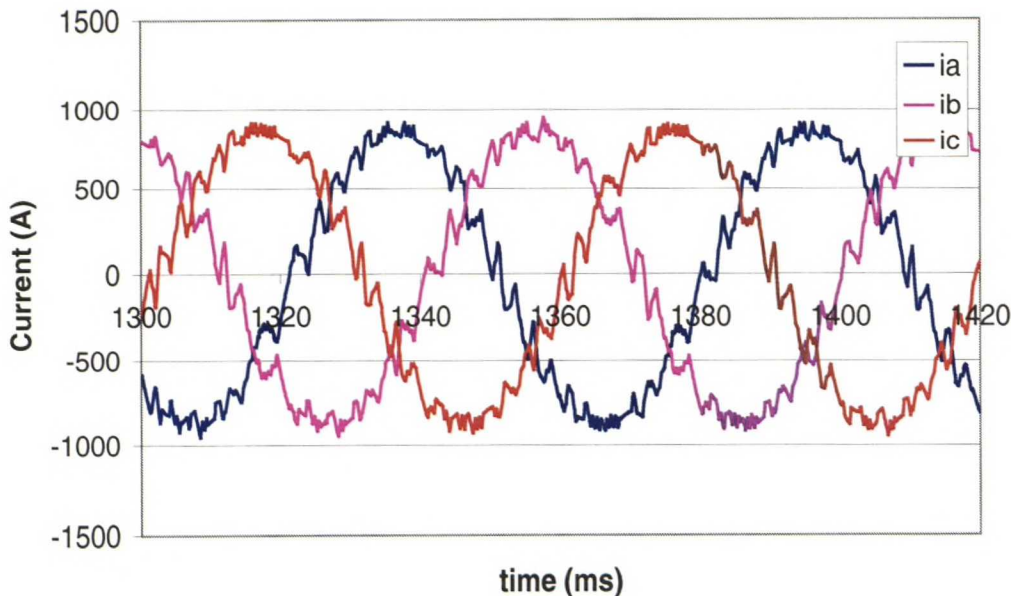
t	aika
P	kuormitusteho
$t_{\text{load cycle}}$	kuormitusjakson aika
t_{load}	toiminta-aika vakio kuormalla
$t_{\text{no-load}}$	toiminta-aika tyhjäkäynnillä
P_H	häviöteho
T	lämpötilat
T_{maxF}	F-luokan sallima maksimi lämpötila
T_{maxB}	B-luokan sallima maksimi lämpötila

LIITE 2: ACS 6000SD:n jännite ja virta

ACS 6000SD voltage supply



ACS 6000SD stator phase currents



LIITE 3: Nestorin käyttöliittymä 1

Nestori - [Project data]

File Edit View Database Actions Report Parameters Help

Project **Position**

Project Name Azipod DTC L1 = 3000, testi Project 1020XX
Customer Testiasiakas Cust. ref

Position Type Machine
Pos. no. 101

New Delete Previous Next Quick search Search Copy Create offer

Project name Azipod DTC L1 = 3000, testi Firstlast name Testi Asiakas
Project number 1020XX Contact Juha Kivioja Department Osasto
Quotation sent 2.5.2003 Validity 60 days Phone 01010101
Status Planned Probability 0 % Telefax 02020202
Contract no. Cust. no. Customer ref.
Customer Testiasiakas Cust. name 2
Country of destin. ANDORRA Address Aslakkaan osoite
Terms of payment 100% AT DELIVERY
IN CASH
Overdue pmt int. 14 Currency EUR
Terms of delivery Final customer Loppuasikas
Place ☐ Documentary

Pos	Name	Qty	Price (EUR)	PGP (%)	Output	Voltage	PF	Freq	IM	IP	IC
101	AMZ 1250ZM12 LSF	1	0	-999999,00	18000	6200	1,00	15,1	7301	44	8A6W7
102	AMZ 1250ZM12 LSF	1	0	-999999,00	19500	3100	1,00	15,1	7301	44	8A6W7
103	AMZ 1250ZM12 LSF	1	0	-999999,00	19500	6200	1,00	15,1	7301	44	8A6W7
104	AMZ 1250ZK12 LSF	1	0	-999999,00	16000	3100	1,00	15	7301	44	8A6W7

Ready

Nestori - [Position data]

File Edit View Database Actions Report Parameters Help

Project **Position**

Project Name Azipod DTC L1 = 3000, testi Project 1020XX
Customer Testiasiakas Cust. ref

Position Type Machine
Pos. no. 101

New position Delete position Previous position Next position Copy position Tech. specification

Position 101 Type AMZ 1250ZM12 LSF Rev. B
Type Machine Quantity 1 ☐ Don't include this position to offer
☐ Include exciter values in tech. spec. Notes Enclosures

Primary data Electrical data Configuration Accessories Time schedule Pricing

Base values

Machine type	Motor	Marine	True
Application	Azipod Propulsion	Classification	None
Standard	IEC 60034	Hazardous area classification	None
IEC cooling code	IC8A6W7	Specification	None
Temp rise class	F	Weight	88264 kg
Connection	DTC Synchro	Rotation/Rotated machine	
Direction of rotation	CCW	Number of bearings	2
Service factor	1		
With brushes	False		

Type designation

AMZ 1250ZM12 LSF
Product family 19

Environment

Ambient temp 45 °C
Coolant temp 36 °C
Altitude 1000 m

Edit primary data

Ready

LIITE 4: Nestorin käyttöliittymä 2

Primary data

Project: Azipod DTC L1 = 3000, testi
 Quotation: 1020XX Position: 101 Seller: JUKI
 Type: Machine Status: P

Rotation/Rotated machine	<input type="text"/>	IP code	IP44
Machine type	Motor	Ambient temp	45 °C
Application	Azipod Propulsion M	Coolant temp for heat exchange	36 °C
Standard	IEC 60034	Altitude	1000 m
IEC cooling code	IC8A6W7	Service factor	
Temp rise class	F	Duty	S1
Power supply	DTC Synchro	Dir. of rotation	CCW
Classification	None	Number of bearings	2
Hazardous area classification	None	Excitation	<input type="checkbox"/> With brushes
Specification	None		

☒ Marine Inclination: 0

☒ OK

Search values for variable speed motor

Rated output	3000	kW
Base speed	800	rpm
Max. speed	1000	rpm

Field weakening point	800	rpm
Field forcing	5	%

Overload	115	%	Continuous	Class B
Max. load	200	%	1h	Class B

Max. motor voltage	3150	V
Min. motor voltage	2500	V
Number of stator systems	1	
Min. field weakening frequency	8	Hz
Max. drive frequency	65	Hz

☐ Force selection to (Optional)

☐ Calculate without user prompts

☒ OK ☒ Cancel

LIITE 5: Bemarkin käyttöliittymä

Project Name:

Project Reference:

Own Reference:

Prepared by:

Yard:

End Customer

Status:

Estimated order date:

Estimated delivery date:

Propeller type:

Network frequency:

Propeller speed:

Juha Kivioja

A

III/2002

III/2002

FP

60

145

Exact dates:

29.9.2002

29.9.2002

User's manual in short:

1. Fullfill this sheet

2. Select sheet depending on machine type

3. Fullfill the yellow areas

4. Push the button "Select"

About this program

Name: BEMARI

Made for You ! Have a nice ride !

By: Jouni Jaakkola; Esa Kolu; John Shibutani

The colours have following meanings:

Input data. You may format

Result of calculation.Format if you dare

Formula. Do not touch

Cell under construction

Constans

VALIDITY:

This program is updated:

This program is valid until:

All prices are in EUR

For restictions in use, pls see separate document

2.7.2002

30.6.2003

Azipod: _____

Internal Notes:	
Inlet air temperature(20-45)	45
Maximum output power	14 500
Constant voltage speed	127
Rated speed	132
Propeller speed (Master	145
Maximum speed	150
Main stator voltage	3 140
- no of st systems	2
Network frequency	60

NOTE: Always press SELECT button after changing data

Propulsion: _____

NOTE: Always press SELECT button after changing data		
Propeller speed (Master Sheet)	145	rpm
Maximum output power	10 000	kw
Constant voltage speed	127	RPM
Rated speed	132	RPM
Maximum speed	152	RPM
Main stator voltage	1 570	V
- no of st systems	1	
No of stators in shaftline	1	
Network frequency	60	Hz
Water temp. inlet	38	C-deg.
Ambient temp.	50	C-deg.

LIITE 6: Nestorin uudet mitoitusparametrit (Metals)

Search values for variable speed motor

Mode of supply bridge (ACS6000SD) ARU		Maximum temperature rise 75 K	
		Inlet air temperature 45 C	
Rated output	3500 kW	Motor voltage	3150 V
Base speed	480 rpm	Min. motor voltage	3150 V
Top speed	1200 rpm	Number of stator systems	2
Field weakening point	480 rpm	Min. field weakening frequency	8 Hz
Values from position		Max. drive frequency	65 Hz

Temp class	Overloads	Overload type	Operation times (load/noload)		Speed
F	115 %	Continuous			Base
	125 %	2h			Base
	150 %	Frequently	240 s	60 s	Base
	180 %	Occasionally (1/	45 s		Base
Maximum load	225 %	Occasionally (1/	15 s		Top

Values to position

☐ Force selection to (Optional) Frame size No of poles

☐ Calculate without user prompts
☒ Advanced user (Optional)

OK **Cancel**

Derating factors:		Temprise difference between coolant and inlet air:		Special connection code:
Stator:	1	Water: IC8A6W7	15 C	YY mixed slots
Rotor:	1	Air: IC6A6A6	25 C	
Flux:	1	Canal: IC3A7	6 C	

LIITE 7: Nestorin uudet mitoitusparametrit (Azipod)

Search values for Azipod motor

Mode of supply bridge (ACS6000SD): LSU

Inlet air temperature 45 C

Maximum output power 17000 kW

Propeller speed 180 rpm

Field weakening point 165 rpm

Rated speed 165 rpm

Max. speed 185 rpm

Values from position

Main stator voltage 3100 V

Number of stator system 1

Min. field weakening frequency 8 Hz

Max. drive frequency 65 Hz

Network frequency 60 Hz

☐ Calculate without user prompts

☒ Ice breaking mode (optional)

OK Cancel

Ice breaking mode when inlet air temp is : 25 C

Overload type Overload pros Overload speed

Continuous 110 Base

LIITE 8: Nestorin uudet mitoitusparametrit (Propulsion)

Search values for Propulsion motor

Mode of supply bridge (ACS6000SD): LSU		Inlet air temperature: 45 °C	
Maximum output power	6500 kW	Main stator voltage	3100 V
Propeller speed	160 rpm	Number of stator system	2, 30°s
Field weakening point	146 rpm	No of stators in shaft line	1
Rated speed	146 rpm	Min. field weakening frequency	8 Hz
Max. speed	166 rpm	Max. drive frequency	65 Hz
Values from position		Network frequency	60 Hz

☐ Force selection to (Optional) Frame size: No. of poles:

☐ Calculate without user prompts ☒ Ice breaking mode (optional)

Ice breaking mode when inlet air temp is : 25 °C

Overload type	Overload pros	Overload speed
Continuous	110	Base

☒ OK ☒ Cancel

LIITE 9: Taajuusmuuttajan aiheuttamat lisähäviöt

